

**NAUDAN LIETELANNAN JA SEPAROIDUN KUIVAJAKEEN YH-
TEISKÄSITTELY TÄYDEN MITTAKAAVAN BIOKAASULAI-
TOKSESSA**

Aatu Heikkinen
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden laitos
Agroteknologia
Huhtikuu 2018

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Maataloustieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Aatu Heikkinen			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Naudan lietalannan ja separoidun kuivajakeen yhteiskäsittely täyden mittakaavan biokaasulaitoksessa			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agroteknologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterintutkielma		Aika — Datum — Month and year Huhtikuu 2018	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 67 s.
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>Työn tavoitteena oli selvittää Luonnovarakeskuksen kanssa naudan lietalannasta separoidun kuivajakeen käyttömahdollisuus ja kannattavuus biokaasulaitoksen lisäsyötteenä. Työn tarkoituksena oli selvittää, kannattaisiko maatilojen yhteiseen biokaasulaitokseen tuoda kauempaa vain suuremman metaanintuottopotentialin omaava kuivajake lietalannan sijasta. Työn toinen tavoite oli selvittää reaktorin sekoituksen tauottamisen ja reaktorin kaasusekoituksen vaikutus energiataseeseen.</p> <p>Maanangan biokaasulaitoksen reaktorin nestetilavuus on 260 m³ ja sen mädäte käsitellään samankokoisessa jälkikaasualtaassa. Laitos on mitoitettu noin 120 naudan lietalannalle ja lisäsyötteelle. Tämän tutkimuksen ja kirjallisuuden perusteella laskettiin separointikustannus, kuivajakeen kuljetuskustannus, säilörehun- ja hävikkisäilörehun kustannus ja mädätteen arvon nousu verrattuna raakalietteeseen. Tulosten perusteella määritettiin kuivajakeen ja säilörehun lisäsyötteenä tuottama lisäarvo, kuivajakeen kannattava kuljetusetäisyys, separointikustannusten vaikutus kannattavuuteen ja kuivajakeen käytön kannattavuus suhteessa säilörehuun.</p> <p>Tutkimus kesti yhteensä 20 viikkoa. Tavoitekuormitus, noin 10 t lietalantaa ja 1 t kuivajakeetta vuorokaudessa, toteutui viikoilla 11–20. Tällöin laitoksen metaanintuotto oli keskimäärin 1360 kWh/vrk ja enimmillään 1600 kWh/vrk. metaanintuottopotentialista toteutui keskimäärin 84 %. Kuivajake kompostoitui varastoitaessa ja varastointiajasta riippuen metaanintuottopotentialia (BMP) oli 1010–1780 kWh/t orgaanista ainetta. Reaktorin jatkuvan sekoituksen (vk 11–14) aikana sekoitustehoa nostettiin, koska reaktorilietteen ka-pitoisuus kasvoi kuivajakeen alhaisen BMP:n vuoksi. Tauotettu sekoitus (vk 15–18) kulutti sähköä 26 % vähemmän kuin jatkuva, mutta metaanintuotto säilyi samalla tasolla kuin jatkuvalla sekoituksella. Kaasusekoitus (vk 19–20) toimi kuivajakeen lisäsyötteessä ja alensi edelleen sekoituksen sähkönkulutusta, mutta sen vaikutus metaanintuottoon jäi epäselväksi.</p> <p>Separointikustannuksiksi saatiin noin 9 €/t kuivajakeetta, kun kuivajakeetta tuotettiin 730 t/v (lietalannasta 365 t/v + mädätteestä 365 t/v). Kuivajakeen kuljetus- ja käsittelykustannus oli 0,50–2,50 €/km/t riippuen kerrallaan kuljetettavasta määrästä. Säilörehun syötekustannukseksi saatiin 57,3 €/t. Hävikkisäilörehun kustannus oli 36 €/t. Todettiin, että kuivajakeen kannattava kuljetusmatka on alle 9 kilometriä suuntaansa, jos biokaasulla korvattiin ostosähköä ja hakeämpöä Maanangan navetalla. Sähköä ja kevyttä polttoöljyä korvattaessa etäisyys oli 30 kilometriä.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Biokaasu, lietalanta, kuivajake, kannattavuus			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Työtä ohjasivat Hannu Mikkola, Ville Pyykkönen, Laura Alakukku			

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Aatu Heikkinen			
Työn nimi — Arbetets titel — Title The use of dairy cattle slurry and separated slurry in full scale biogas plant			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agrotechnology			
Työn laji — Arbetets art — Level Master's thesis		Aika — Datum — Month and year April 2018	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 67 p.
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>The target of this study was to examine if it is technically and financially sensible to co-digest separated cattle slurry solid fraction with cattle slurry in a biogas plant. The purpose of this work was to investigate would it be sensible to build a centralized biogas plant and bring only separated solids to the plant from a distance because separated manure has bigger methane potential. The second goal was to investigate if there is some influence on energy balance when reactor mixing is paused or mixed with biogas.</p> <p>The Maaninka biogas plant consists of a reactor and a post-digestion unit, both having a liquid volume of 260 m³. The plant is designed for treating the slurry of 120 cows plus additional feedstocks. From measurements and with the help of literature, cost of separation, transport of separated manure, silage, excess silage and price of digestate nutrients were calculated. On the grounds of results, profitable transport distance for separated manure, influence of separation cost on profitability and separated manure costs compared to silage and excess silage were calculated.</p> <p>Study lasted 20 weeks. The target loading rate of 10 t slurry and 1 t solid fraction per day was realized after 10 weeks, so measurements and influence of reactor mixing modes were studied during weeks 11–20. During that period, the average methane production was 1600 kWh/vrk and the highest gas production was 1600 kWh/d. On average, 84% of feedstock methane potential (BMP) was realized. Separated manure decomposed aerobically when manure was stored and its BMP was 1010 kWh/t – 1780 kWh/t of organic matter. When reactor mixing was continuous (on weeks 11–14), mixing power was increased to 73 kWh/d because digestate total solids concentration increased. In stage two (on weeks 15–18), paused mixing of reactor used 26% less electricity, while methane production was the same as in continuous mixing. The electricity usage was still decreased in stage three, pneumatic (biogas recirculation) mixing (weeks 19–20) but the effect on methane production was unclear.</p> <p>The separation cost was 9 €/t separated manure, when the annual separated mass was 730 t/v (slurry 365 t/v + 365 t/v digestate). Transportation and handling cost for the separated manure was 0.5–2.5 €/km/t depending on the transported cubic metres (4 m³ or 20 m³). The cost of silage feed was 57.3 €/t, the cost of excess silage was 36 €/t. The profitable transport distance was 9 kilometres when chips were replaced with biogas as heating energy. When oil was replaced, the profitable distance was 30 kilometres.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Biogas, Biogas plant, separated manure, profitability			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Department of Agricultural Sciences and Viikki Campus Library			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Supervisors: Hannu Mikkola, Ville Pyykkönen, Laura Alakukku,			

Sisällys

LYHENTEET JA SYMBOLIT.....	6
1 JOHDANTO.....	7
2 BIOKAASUN TUOTANNON PERUSPERIAATTEET	8
2.1 Biokaasun tuotantoprosessi	9
2.2 Biokaasun tuotanto-olosuhteet.....	10
2.2.1 Biokaasun raaka-aineet	13
2.2.2 Biokaasuprosessin ympäristövaikutukset	13
2.2.3 Reaktorin sekoitus	14
2.3 Kotieläintilan ravinteiden kierto biokaasulaitoksen kanssa	15
2.4 Biokaasulaitos	16
2.4.1 Biokaasulaitoksen rakenne	16
2.4.2 Biokaasulaitoksen energian tuotto	17
2.4.3 Biokaasulaitoksen lopputuotteiden hyödyntäminen	18
2.5 Biokaasulaitoksen kannattavuus	18
2.6 Yhteenveto kirjallisuudesta	19
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET.....	20
4 AINEISTO JA MENETELMÄT.....	21
4.1 Maanangan koetila ja biokaasulaitos.....	21
4.2 Tutkimuksen osa-alueet.....	22
4.3 Mittauslaitteisto	24
4.3.1 Kuormituksen mittaaminen	24
4.3.2 Viipymän mittaaminen.....	26
4.3.3 Metaanin tuoton mittaaminen.....	27
4.3.4 Reaktorin sekoitustehon mittaaminen	28
4.3.5 Biokaasulaitoksen energiataseen laskenta	28
4.3.6 Separoinnin ravinne- ja massataseen laskenta	29
4.3.7 Metaanintuottopotentialien määrittäminen	29
4.3.8 Säilörehun tuotantokustannusten määrittäminen	30
4.4 Separointikustannukset.....	30
4.5 Kuivajakeen kuljetuskustannuksien ja ravinteiden arvon määrittäminen	32
4.6 Biokaasulaitoksen lisäsyötteiden ja sekoitusmenetelmien vertailu	33
4.7 Kuivajakeen kuljetuksen kannattavuus.....	35
5 TULOKSET.....	36
5.1 Koejaksot	36
5.2 Syötteiden metaanintuottopotentialit (BMP:t)	37
5.3 Tutkimuksen aikana toteutuneet kuormitukset ja viipymäajat	38
5.4 Tutkimuksen aikana toteutuneet kuivajakeen lämpötilat.....	39
5.5 Toteutuneet energian tuotot ja kulutukset.....	39
5.6 Reaktorin sekoitustavan vaikutus metaanintuottoon ja energiataseeseen	41
5.6.1 Jatkuva sekoitus upposekoittimilla	43
5.6.2 Tauotettu sekoitus upposekoittimilla	44
5.6.3 Kaasusekoitus	45
5.7 Eri sekoitusmenetelmien metaanintuottojen vertailu.....	46
5.8 Kuivajakeen ja nurmisäilörehun lisäsyötteidenä tuottama nettoenergia	48
5.9 Mädätteen separoinnin massa- ja ravinnetase	49

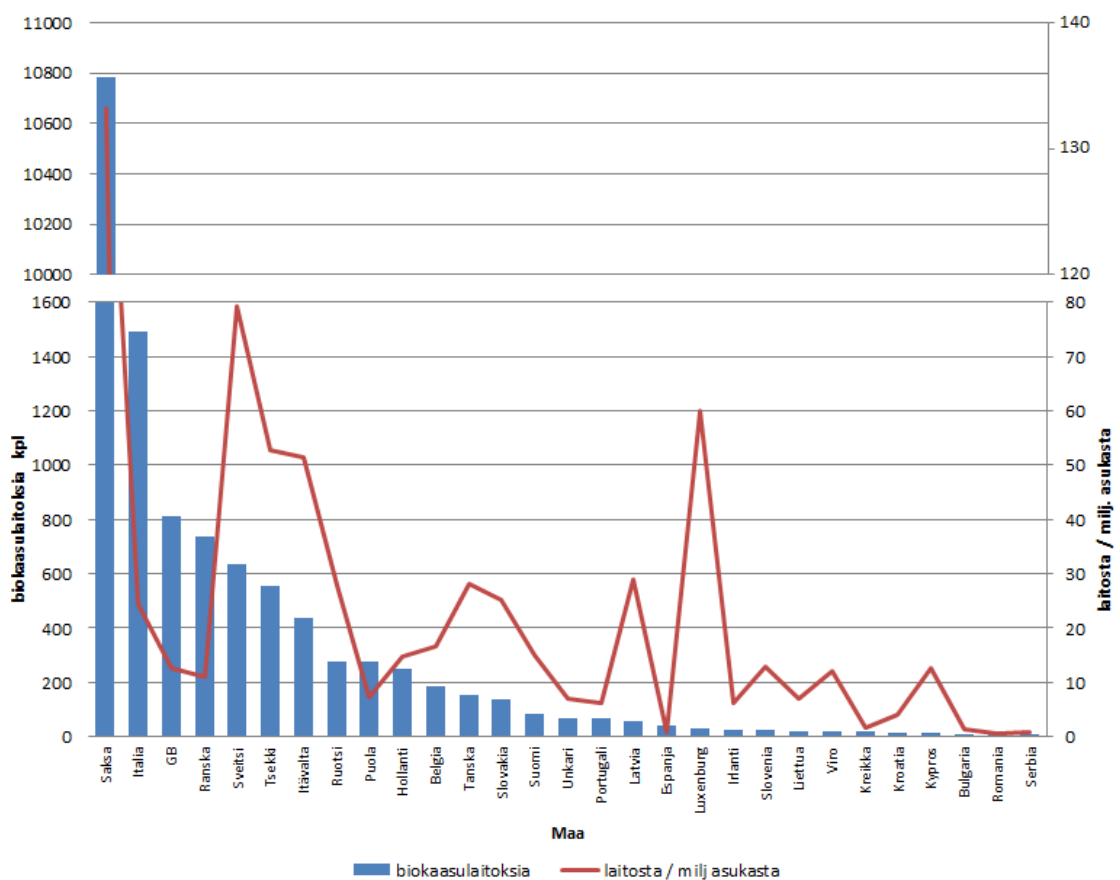
5.10 Lannan käsittelykustannukset	50
5.11 Mädätteen arvo	51
6 TULOSTEN TARKASTELU	51
6.1 Kuivajakeen käytön vaikutus Maaningan biokaasulaitoksen metaanintuottoon	52
6.2 Sekoitustavan vaikutus biokaasulaitoksen energiataseeseen.....	53
6.3 Sekoitustavan vaikutus biokaasulaitoksen metaanintuottoon	54
6.4 Kuivajakeen käytön kannattavuus suhteessa säilörehun käyttöön..	54
6.5 Separointikustannuksen vaikutus kuivajakeen käytön kannattavuuteen	56
6.6 Kuivajakeen kannattava kuljetusetäisyys	57
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	58
8 KIITOKSET	59
LÄHTEET	60
LIITE 1. KULJETUSMATKAN AIHEUTTAMAT KUSTANNUKSET	65
LIITE 2. SEPAROINTIKOKEEN TULOKSET	66
LIITE 3. KULJETUSKUSTANNUKSEN ARVOT	66
LIITE 4. MÄDÄTYSJÄÄNNÖKSEN ARVON MÄÄRITYS	67
LIITE 5. SEPAROINTIMÄÄRÄN VAIKUTUS KANNATTAVUUTEEN TOTEUTUNEET ARVOT	67

LYHENTEET JA SYMBOLIT

BMP	Metaanintuottopotentiaali (Biomethane potential)
CHP	Yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto (Combined Heat and Power)
CSTR	Jatkuvasti sekoitettu säiliöreaktori (Continuously stirred-tank reactor)
HRT	Hydraulinen viipymäaika (Hydraulic retention time)
OLR	Orgaaninen kuormitus (Organic loading rate)
SRT	Kiinteän aineen viipymä (Solids retention time)
TS	Kuiva-ainepitoisuus (Total solids)
UASB	Ylivirtaukseen perustuva reaktori (Upflow anaerobic sludge blanket digestion)
VFA	Haihtuvat rasvahapot (Volatile fatty acids)
VS	Orgaanisen aineen osuus kuiva-aineesta (Volatile solids)

1 JOHDANTO

Suomessa oli vuonna 2014 toiminnassa 13 maatilakohtaista biokaasulaitosta (Huttunen ja Kuittinen 2015). Yhteensä biometaani- ja biokaasulaitoksia oli Suomessa 83 kappaletta (EBA 2015). Euroopassa biokaasulaitoksia oli vuonna 2014 yli 17 000, joista yli 10 000 oli Saksassa (EBA 2015). Kuvan 1 perusteella voidaan päätellä, että suuressa osassa Eurooppaa biokaasun tuotannon potentiaalia ei hyödynnetä maksimaalisesti.



Kuva 1. Euroopassa vuonna 2014 käytössä olleiden biometaani- ja biokaasulaitosten määrä. Mukana tilastossa ovat myös teollisuuden biokaasulaitokset. Kuva on muokattu lähteestä European Biogas Association (2015).

Maatilojen energian ostokustannukset ja ympäristöhaitat ovat kasvaneet viime vuosikymmeninä merkittävästi muun muassa maatalouden koneellistumisen ja kasvinsuojeluaineiden käytön myötä (Regina ym. 2014). Maatilamittaakaavan biokaasun tuotannolla voidaan parantaa lähialueen energian ja ravinteiden kiertoa sekä vähentää maatalan energian osto- ja tuotantokustannuksia (Dennis ja Burke 2001). Biokaasun tuotannon kannattavuus

Suomessa on useimmiten heikko (Luke 2011, Luke 2013), mutta kannattavuutta voitaisiin mahdollisesti parantaa tilojen välisellä yhteistyöllä. Biokaasulaitoksen tehokkuutta voidaan parantaa kuljettamalla yhteistyötiloilta lietelantaa suuremman kaasuntuottopotentiaalin omaava separoitu kuivajae biokaasureaktoriin (Pyykkönen ja Luostarinen 2013). Kuivajakeen lietelantaa suurempi kaasuntuottopotentiaali perustuu siihen, että lietelannassa oleva vesi ei tuota biokaasua, mutta kuivajakeen syöttäminen prosessiin parantaa metaanintuottoa tuorepainoon nähden (Triolo ym. 2011).

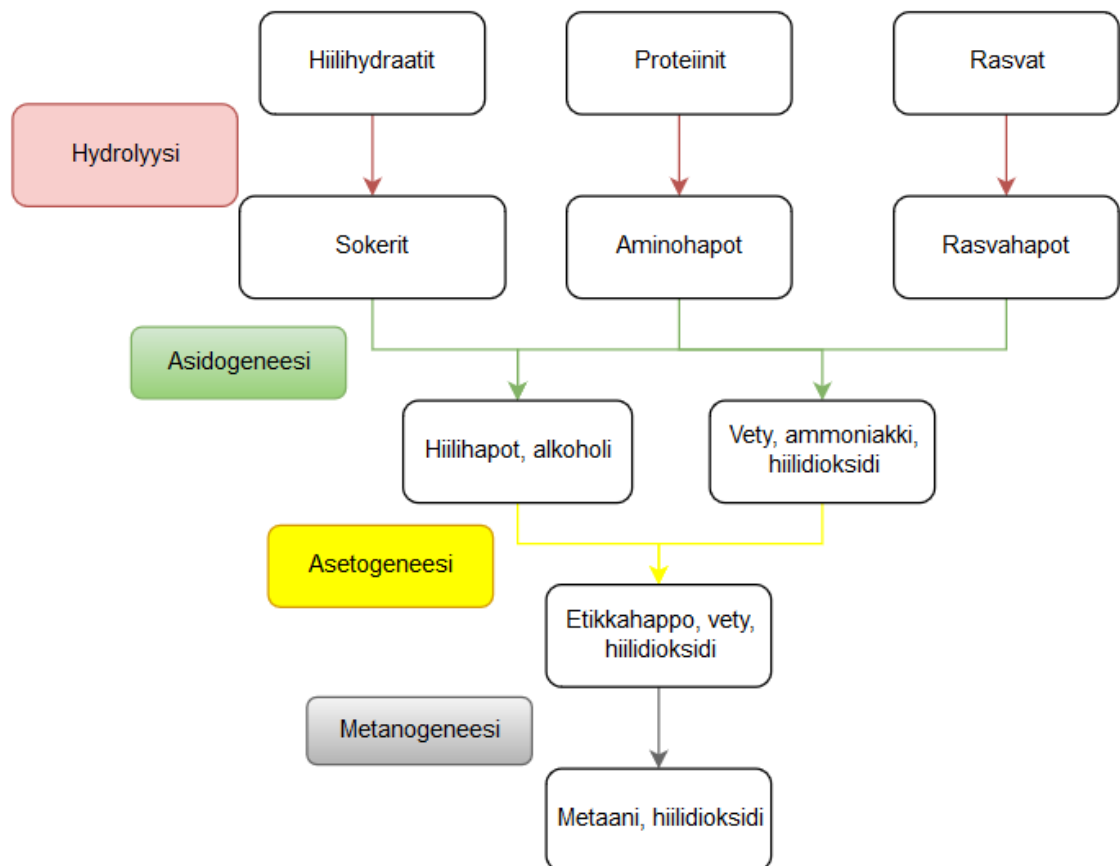
Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää lietelannasta separoidun kuivajakeen käytön kustannukset ja kannattavuus biokaasulaitoksessa. Toinen tavoite oli selvittää reaktorin sekoitusfrekvenssin ja sekoitustavan vaikutus biokaasulaitoksen energiataseeseen. Tutkielma liittyy Luonnonvarakeskuksen lantalogistiikka-hankkeeseen (Pyykkönen 2015). Tutkimuksen taustalla oli ajatus, että yhteistyötiloilta tuotaisiin kuivajae biokaasulaitokseen ja paluukuormassa vietäisiin takaisin prosessin läpi käynyttä separoitua käsitteilyjäännöstä. Tutkielmassa laskettiin kuivajakeen syötön vaikutukset biokaasuprosessin orgaaniseen kuormitukseen, viipymään, metaanintuottoon ja energiataseeseen. Lisäksi tutkittiin sekoitustehon muuttamisen sekä kaasusekoituksen vaikutusta reaktorin metaanin tuottoon ja energiataseeseen. Tutkielmassa laskettiin myös, kuinka kaukaa kuivajae kannattaa tuoda biokaasulaitokseen käsiteltäväksi, jotta lisäsyötteestä saatava kaasun tuotto ylittää kustannukset.

2 BIOKAASUN TUOTANNON PERUSPERIAATTEET

Biokaasua saadaan anaerobisessa käymisessä, kun mikrobit hajottavat biomassaa. Biokaasun tuotanto on täten uusiutuvan energian tuotantoa. Tuotettu kaasu voidaan muuttaa lämmöksi, sähköksi tai esimerkiksi liikennepolttoaineeksi (Dennis ja Burke 2001). Tuotetun kaasun määrään ja laatuun vaikuttavat syötteet ja niiden kaasuntuottopotentiaali. Kaasun koostumukseen vaikuttavat syötteiden proteiinin, rasvan, kuidun, selluloosan, hemiselluloosan, tärkkelyksen ja sokerin pitoisuudet sekä niiden hajoavuus (Amon ym. 2007). Lopputuotteena syntyy kaasuja sekä osittain hajonnut biomassa eli mädäte. Naudan lannasta tuotettu biokaasu on pääasiassa metaania (noin 60–65 %) ja hiilidioksidia (Haandel ja Lubbe 2007, Triolo ym. 2011). Loppuosa kaasusta (< 1 %) on typpeä, vetyä, ammoniakkia ja rikkivetyä (Al Seadi 2001).

2.1 Biokaasun tuotantoprosessi

Biokaasun tuotantoprosessissa on neljä samanaikaisesti tapahtuvaa vaihetta (Haandel ja Lubbe 2007). Vaiheet ovat hydrolyysi, asidogeneesi, asetogeneesi ja metanogeneesi (kuva 2). Biokaasun tuottamiseen tarvitaan kaikkia neljää vaihetta, sillä edellisten prosessien lopputuotteet ovat seuraavien prosessien lähtötuotteita (Al Seadi 2001).



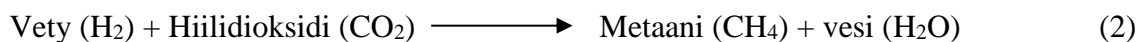
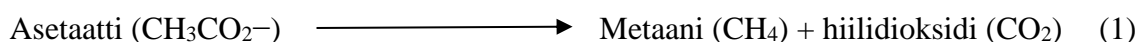
Kuva 2. Anaerobisessa käymisessä on neljä yhtäaikaaisesti tapahtuvaa vaihetta, joissa syntyy joko välituotteita tai metaania. Käymisen vaiheet ovat hydrolyysi (kuvassa punaisella), asidogeneesi (kuvassa vihreällä), asetogeneesi (kuvassa keltaisella) ja metanogeneesi (kuvassa harmaalla). Muokattu lähteestä Al Seadi (2001).

Ensimmäinen vaihe on hydrolyysi. Hydrolyysissä entsyymit pilkkovat eloperäisen materiaalin rasvoja, hiilihydraatteja ja proteiineja (Al Seadi ym. 2008, Dennis ja Burke 2001). Hydrolyysi on yleensä biokaasuprosessin rajoittava tekijä (Haandel ja Lubbe 2007), minkä vuoksi hydrolyysiä pyritään usein edistämään esikäsittelemällä syötemateriaalia. Käsittelyllä syötemateriaalin pinta-ala pyritään tekemään mahdollisimman suureksi, jotta hydrolyysin teho saadaan maksimoitua (Al Seadi ym. 2008, Dennis ja Burke 2001).

Toinen vaihe on asidogeneesi, jossa hydrolyysin lopputuotteet muutetaan asidogeenibakteerien avulla metanogeenin lähtöaineiksi. Hiilihydraatteja, proteiineja ja rasvahappoja hajotetaan vedyksi, asetaatiksi ja hiilidioksidiksi. Tällöin syntyy myös lyhytketjuisia haihtuvia rasvahappoja (VFA) ja alkoholia (Haandel ja Lubbe 2007, Al Seadi ym. 2008).

Kolmas vaihe on asetogeneesi, jossa asidogeenisissa valmistuneet, metanogeeniin kelpaamattomat tuotteet muutetaan metanogeenille käyttökelpoiseen muotoon. Haihtuvat rasvahapot ja alkoholi hapetetaan asetaatiksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi (Haandel ja Lubbe 2007, Al Seadi ym. 2008).

Neljäs vaihe on metanogeneesi, jossa välituotteet muuttuvat metanogeenibakteerien (*Methanosarcinales*-, *Methanomicrobiales*-, *Methanobacteriales*-, *Methanococcales*- ja *Methanopyrales-lahkot*) avulla metaaniksi, hiilidioksidiksi ja vedeksi (Al Seadi 2001, Yli-Puntari 2013) (reaktiot 1 ja 2). Noin 70 % syntyvästä kaasusta muodostuu asetaatista (CH_3CO_2^-) ja loput vedystä (H_2) ja hiilidioksidista (CO_2) (Wellinger 1999, Al Seadi ym. 2008).



2.2 Biokaasun tuotanto-olosuhteet

Biokaasun tuotannossa oikeilla olosuhteilla on suuri merkitys. Jonkin osa-alueen häiriintyessä tuotanto voi romahtaa ja tuotanto saatetaan joutua käynnistämään uudelleen. Biokaasun tuotannon tehokkuuteen ja tuotannon määrään vaikuttavat seuraavat tekijät (Dennis ja Burke 2001, Haandel ja Lubbe 2007, Al Seadi ym. 2008):

- Syötteen laatu, konsentraatio ja lämpötila
- Myrkyllisten aineiden määrä
- pH (liuoksen happamuus)
- HRT (hydraulinen viipymäaika)
- SRT (kiinteän aineen viipymä)
- OLR (orgaaninen kuormitus)
- reaktorin sekoittaminen

Syötteen laatu vaikuttaa tuotetun kaasun määrään, sillä kaikki materiaali ei tuota kaasua. Esimerkiksi anaerobiset mikrobit eivät pysty hajottamaan ligniiniä. Syötteen laatu vaikuttaa biokaasun tuotannon tehokkuuteen myös siten, että veteen liukenemattomat aineet hajoavat hitaammin kuin vesiliukoiset. Syötteen ravinnekonentraation tulisi olla käytetylle bakteerikannalle mahdollisimman tasapainoinen, sillä liian pieni konsentraatio ei ole kaasun tuotannon kannalta tehokasta ja suurempi konsentraatio voi puolestaan tuottaa liikaa prosessia heikentäviä aineita, kuten ammoniakkia ja rikkivetyä. Hiili/typpi-suhteen tulee olla alle 43 ja hiili/fosfori-suhteen alle 187. Optimaalinen hiili/typpi-suhde on 20–25 (Dennis ja Burke 2001).

Viipymääjan pituuteen vaikuttavat syötteen määrä ja laatu sekä prosessin lämpötila. Biokaasuprosessin lämpötila voidaan jakaa kolmeen alueeseen. Ne ovat psykrofiilinen (lämpötila alle 25 °C), mesofiilinen (25–45 °C) ja termofiilinen (45–70 °C). Psykrofiilisessa reaktiossa viipymäaika on 70–80 päivää, mesofiilisessa reaktiossa 30–40 päivää ja termofiilisessa reaktiossa 15–20 päivää. Syötteen hajoamisnopeuteen vaikuttaa lämpötila. Reaktorin koko määritetään halutun viipymääjan ja syötteen määrän perusteella. Pääsyötteen ollessa lietelanta prosessin lämpötila on yleensä 35–37 °C. Reaktion pitämiseksi stabiilina on tärkeää, että lämpötila on tasainen, sillä muuten kaasun tuotto pienenee (Dennis ja Burke 2001, Haandel ja Lubbe 2007, Al Seadi ym. 2008). Viipymäaika on kääntäen verrannollinen lämpötilaan eli lämpötilan noustessa viipymäaika lyhenee (Al Seadi ym. 2008).

Prosessille elintärkeitä metanogeenit toimivat parhaiten, kun mesofiilisen reaktion pH on 6,5–8,0. Jos happoja muodostuu enemmän kuin metaania muodostavat bakteerit ehtivät käyttää, biokaasulaitoksen pH laskee ja metaanin tuotto hidastuu (Dennis ja Burke 2001, Al Seadi ym. 2008). Toisaalta pH:n noustessa ammoniakkin osuus kasvaa, mikä myös hidastaa metaanin tuottoa (Hansen ym. 2008). Biokaasulaitoksen pH:ta voidaan säätää tarvittaessa biokarbonaateilla (Al Seadi ym. 2008). Biomassan puskurikapasiteetilla on pH:n stabiiliuden kannalta suuri merkitys, jotteivät pienet vaihtelut syötteissä ja kaasun tuotossa vaikuta prosessin tasapainoon häiritsevästi (Björnsson ym. 1997).

Orgaaninen kuormitus (OLR) kuvaa laitokseen syötetyn orgaanisen aineen määrää. Liian pieni orgaaninen kuormitus johtaa huonoon kaasun tuottoon, mutta toisaalta liian suuri orgaanisen aineen määrä johtaa välituoteinhibitioon. Välituoteinhibitio on ilmiö, jossa

metaania ei ehdi muodostua riittävästi suhteessa muodostuviin rasvahappoihin ja asetaattiin. Tällöin reaktorin pH laskee ja metaanintuotto laskee (Mata-Alvarez ym. 2000).

Optimaaliseen orgaanisen aineen määrään reaktorissa vaikuttaa bakteerien kyky hajottaa orgaanista ainesta. Jos syötteeseen lisätään orgaanista ainesta, lisäyksen tuoton täytyy korvata lisäyksestä aiheutuvat kustannukset (Al Seadi ym. 2008). Orgaaninen kuormitus on yleensä 2,5–3,5 kgVS/m³vrk (Wellinger 1999).

Hydraulinen viipymäaika (HRT) kertoo syötteen keskimääräisen viipymän reaktorissa. Viipymän on oltava riittävän pitkä, jotta prosessille tärkeät mikro-organismit ehtivät kasvaa vähintään yhtä paljon kuin mädätteen mukana poistuu. Toisekseen haihtuvien rasvahappojen (VFA) täytyy ehtiä hajota biokaasuprosessissa (Al Seadi ym. 2008, Wellinger 1999). Syötteen viipymäaika vaikuttaa myös reaktorin kaasuntuottotehokkuuteen (Al Seadi ym. 2008).

Kiinteän aineen viipymä (SRT) kuvaa prosessissa olevan kiintoaineen määrää. Kiinteän aineen viipymä vaikuttaa bakteerikannan sopeutumiseen. Liian lyhyt viipymä alentaa kaasuntuottoa kiintoainekiloa kohden (Dennis ja Burke 2001, De La Rubia ym. 2006). Toisin sanoen bakteerien täytyy ennättää sopeutua kuormitustasoihin. Maatilanmittakaavan laitokset ovat yleensä jatkuvatoimisia sekoitussäiliöreaktoreita (CSTR), jolloin hydraulinen viipymäaika tarkoittaa samaa kuin kiinteän aineen viipymä. Vedenpuhdistamoilla usein käytetyissä matalan kuiva-ainepitoisuuden ylivirtausreaktoreissa (UASB) kiinteän aineen viipymäaika on suurempi kuin hydraulinen viipymäaika (Tawfik ym. 2006).

Sekoittamalla prosessissa olevaa ainesta, mikrobien lähettyville saadaan jatkuvasti uutta hajotettavaa materiaalia, jolloin kaasun tuotto tehostuu. Jos prosessissa olevaa ainesta ei sekoiteta kunnolla, prosessi saattaa pysähtyä. Sekoittaminen tasaa lämpötilaeroja, vapauttaa biokaasukuplia, estää painavamman massan laskeutumista ja estää kuoren muodostumista massan pinnalle (Wellinger 1999). Liian tehokas sekoittaminen voi heikentää mikrobien kaasuntuottokykyä, jos mikrobit eivät saa kunnollista kontaktia biomassaan (De Bok ym. 2004).

2.2.1 Biokaasun raaka-aineet

Biokaasuprosessiin syötetään yleensä useaa materiaalia kerrallaan. Biokaasun tuotannossa voidaan käyttää periaatteessa kaikkia muita eloperäisiä raaka-aineita paitsi puuta (Steffen 1998, Luostarinen ja Pyykkönen 2013). Maataloudessa biokaasuntuotannon yleisin raaka-aine on lietelanta (Lehtomäki ym. 2007). Lannassa on helpommin hajoavaa orgaanista ainesta kuin muissa maatalouden sivutuotteissa (Triolo ym. 2011). Muita mahdollisia syötteitä ovat orgaaniset jätteet, jäteliete ja energiakasvit kuten maissi (*Zea mays*), nurmi tai apilat (*Trifolium* sp.) (Steffen ym. 1998, Al Seadi 2001, Luostarinen ja Pyykkönen 2013).

Lietelanta on hyvä perussyöte, sillä se on ravinteikasta ja sen puskurointikyky on hyvä. Lietteen pH, ravinteiden konsentraatio, laatu tai lämpötila eivät juurikaan vaihteile. Lietteen kuiva-ainepitoisuus on noin 10 %, josta orgaanista ainetta on noin 80 % (Suomalainen 2007). Liete täytyy syöttää biokaasulaitokseen mahdollisimman tuoreena, jotta tuotettu biokaasun määrä saadaan maksimoitua (Lehtomäki ym. 2007, Al Seadi ym. 2008, Lehtinen 2011). Biokaasun tuotantoa häiritseviä aineita ovat prosessille haitalliset aineet, kuten happi ja maidon mukana tulevat antibiootit (Dennis ja Burke 2001, Al Seadi ym. 2008).

2.2.2 Biokaasuprosessin ympäristövaikutukset

Mädätyksellä voidaan vähentää kotieläintuotannosta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä (Amon ym. 2006) ja hidastaa ilmaston lämpenemistä, koska biokaasulla voidaan korvata mm. sähkön ja lämmön tuottoon käytettyjä fossiilisia polttoaineita (Lehtomäki ym. 2007, Al Seadi ym. 2008, Luostarinen ym. 2016). Myös biokaasun tuotannosta ja käytöstä vapautuu kasvihuonekaasuja, mutta se eroaa fossiilisesta energiasta siinä, että energia on otettu suoraan hiilen nopeasta kierrosta eikä maapallon pitkäaikaisista hiili-, maakaasu- ja öljyvarastoista (Al Seadi ym. 2008, Budzianowski ja Postawa 2015). Hiiltä ei vapaudu enempää kuin lannan luonnollisessa hajoamisessa vapautuisi joka tapauksessa (Taavitsainen ym. 2002).

Winguistin ym:n (2015) mukaan karjatilan kasvihuonekaasupäästöistä yli 60 % johtuu eläinten ruuansulatuksesta ja 20 % lannan varastoinnista. Lannan varastoinnin aiheuttamia kasvihuonepäästöjä voitaisiin Winguistin mukaan vähentää jopa 80 % biokaasuprosessilla (Winguist ym. 2015, Luostarinen ym. 2016). Prosessissa saadaan vähennettyä kasvihuonekaasupäästöjä muuttamalla päästölähteitä energiaksi, jolla voidaan korvata suuremman hiilipäästön omaavia fossiilisia polttoaineita (Winguist ym. 2015). Lisäksi prosessissa suuremman kasvihuonekaasupotentiaalin omaavia kaasuja muuttuu pienemmän kasvihuonekaasupotentiaalin omaaviksi kaasuiksi, sillä esimerkiksi metaania poltettaessa syntyy hiilidioksidia (Dennis ja Burke 2001, Al Seadi ym. 2008, Luostarinen ym. 2016). Anaerobinen mätäneminen biokaasuprosessissa vähentää varastoinnista johtuvaa typen hävikkiä ja tuhoaa taudinaiheuttajia sekä nestemäisestä että kiinteästä syötteestä (Al Seadi 2001, Dennis ja Burke 2001, Taavitsainen ym. 2002).

Biokaasuprosessin jälkeen kasvit pystyvät hyödyntämään paremmin etenkin mädätteen typen, mutta osittain myös mädätteen fosforin. Ravinnehukka pienenee ja ravinteiden alueellinen kierrätys paranee (Al Seadi 2001, Paavola ym. 2016). Liukoista ammoniumtyyppiä on Bo Holm-Nielsenin ym. (1997) tutkimuksen mukaan mädätteessä noin 20 % enemmän kuin raakaliemelannassa. Etenkin orgaanisen typen käytön tehostuminen suhteessa fosforiin (typpi/fosfori-suhteen suureneminen) on hyvä asia, sillä fosfori on yleensä rajoittava tekijä lietalannoitusta suunniteltaessa (Lehtinen 2011). Taavitsaisen (2002) mukaan mädätys nostaa mädätteen pH:ta noin yhdellä yksiköllä verrattuna käsittelemättömään naudan lietteeseen, joten peltojen kalkitustarve vähenee. Toisaalta Ørtenbladin (2015) mukaan pH:n nousu lisää ammoniakkipäästöjen riskiä varastoitaessa sekä levitettäessä. Päästöjen ehkäisemiseksi mädäte täytyy sijoittaa tai mullata peltoon (Winguist ym. 2015). Lisäksi biokaasuprosessilla voidaan vähentää hajuhaittoja jopa 80 % (Hellstedt ym. 2009).

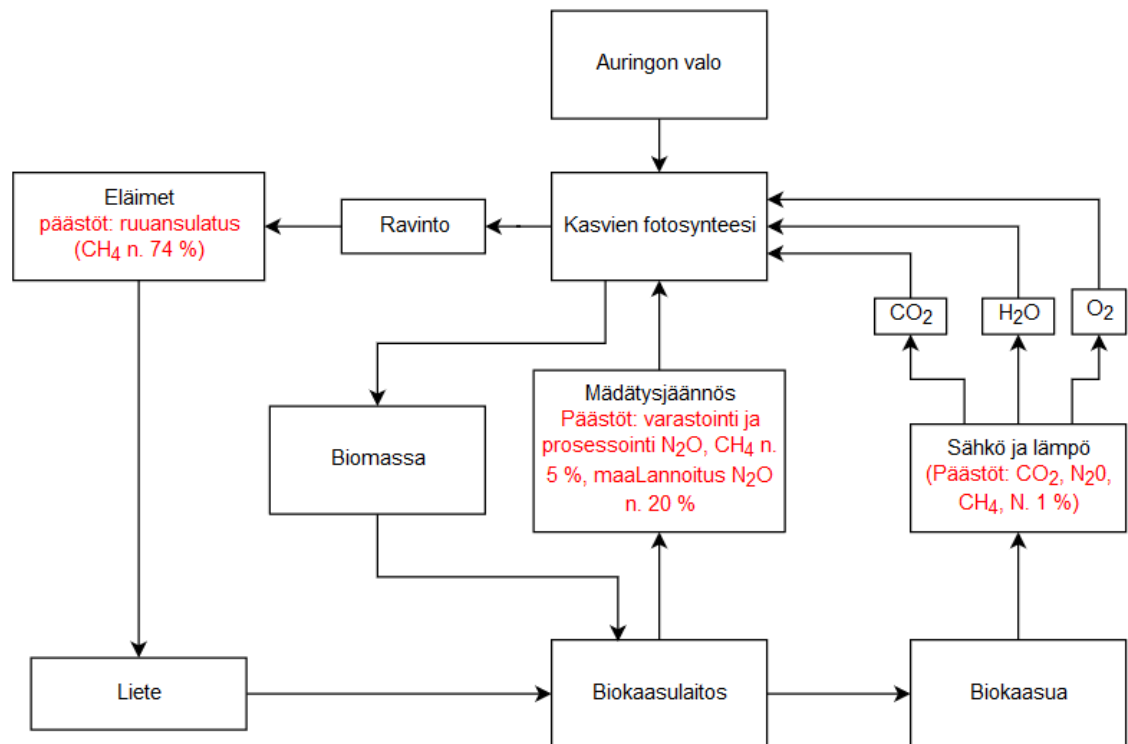
2.2.3 Reaktorin sekoitus

Kaparajun ym. (2008) tutkimuksen pilottimittakaavan testeissä havaittiin, että tauottamalla reaktorin sekoitusta päästiin 12,5 % suurempaan kaasun tuotantomäärään kuin jatkuvalla sekoituksella. Karimin ym. (2005) tutkimuksessa puolestaan tauotetulla sekoittamisella päästiin suurissa kuiva-ainepitoisuuksissa parempiin tuloksiin kuin sekoittamatta jättämisellä. Sekoittamatta jättäminen voi synnyttää kaasutaskuja reaktorimassan sisälle

ja lopulta kaasutaskujen purkautuessa lieteroiskeet voivat tukkeuttaa kaasuputkia (Luostarinen ja Pyykkönen 2013). Karimin ym. (2005) tutkimuksen mukaan kaasusekoitus ei vaikuttanut tuotetun biokaasun määrään merkittävästi, kun VS-pitoisuus oli suuri (VS = orgaanisen aineen osuus kuiva-aineesta).

2.3 Kotieläintilan ravinteiden kierto biokaasulaitoksen kanssa

Biokaasuprosessin avulla ravinteiden ja hiilen kierto saadaan kotieläintilalla lähemmäksi suljettua kiertoa (kuva 3). Metaani muuttuu hyödyntämislaitteistossa energiaksi ja hiilidioksidiksi, joka vapautuu ilmakehään. Prosessissa syntyvää biokaasua voidaan käyttää muun muassa sähkön ja lämmön tuotantoon (Dennis ja Burke 2001, Al Seadi ym. 2008).



Kuva 3. Ravinteiden teoreettinen kierto biokaasuprosessissa. Ravinteiden kierto saadaan biokaasuprosessilla suljetuksi. Mustalla on merkitty ravinteiden ja materiaalin kierto prosessissa. Punaisella on merkitty eri päästölähteet ja niiden prosenttiosuudet kokonaispäästöistä. Muokattu lähteistä Al Seadi (2001) ja Winquist ym. (2015).

Biokaasuprosessissa hiilen ja energian kierto on seuraavanlainen. Fotosynteesissä hiilidioksidi sitoutuu kasveihin auringon valon fotonien energian avulla. Tämän energian avulla kasvit tuottavat muun muassa selluloosaa, proteiineja ja lipidejä. Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen ravinteet sitoutuvat kasvien käyttöön, kun mädätysjäännös levitetään

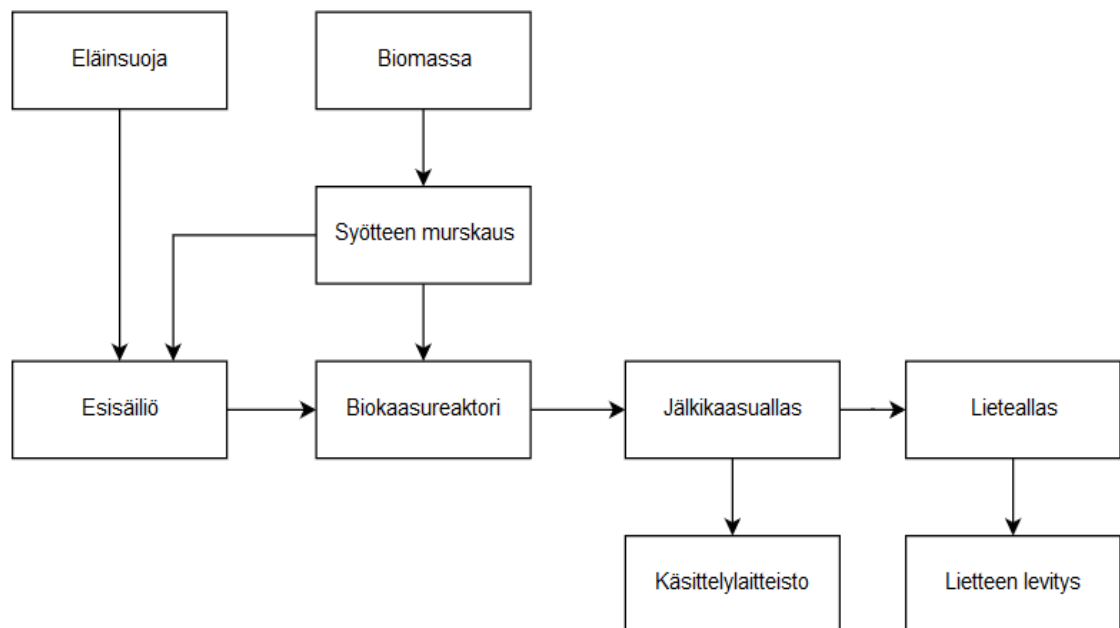
peltoon. Kasveista energia ja ravinteet siirtyvät joko suoraan biokaasulaitokseen lisäsyötteeksi tai eläinten lannan kautta biokaasulaitoksen perussyötteeksi, jolloin ravinteet ovat muodossa, josta voidaan tuottaa uudestaan kaasua.

Biokaasuprosessin päästöistä lähes 75 % syntyy eläinten ruuan sulatuksesta (CH_4). Määtysjäännöksen varastoinnin ja prosessoinnin aikana päästöistä syntyy noin 5 %. Lannoituksen osuus päästöistä on 20 % ja vain noin 1 % päästöistä syntyy sähkön ja lämmön tuotannossa.

2.4 Biokaasulaitos

2.4.1 Biokaasulaitoksen rakenne

Biokaasuprosessin laitteistoon kuuluvat syötteen vastaanotto- tai esisäiliö, reaktori, käsittelyjäännöksen varasto sekä biokaasun hyödyntämislaitteisto. Yleensä rakennetaan myös jälkikaasuallas kaasun tuoton maksimoimiseksi sekä päästöjen vähentämiseksi (kuva 4).



Kuva 4. Syötteiden ja kaasun käsittely biokaasulaitoksessa (Lehtomäki ym. 2007, Luostarinen ja Pyykkönen 2013).

Biokaasulaitokseen liete saadaan pumpaamalla sitä haluttu määrä esisäiliöstä. Maan alla sijaitsevaan esisäiliöön liete valuu painovoimaisesti tai se pumpataan tai työnnetään eläinsuojasta. Kuiva-aines voidaan esikäsitellä ennen reaktoria tai syöttää sellaisenaan ruuvilla tai hihnakuuljettimella (Dennis ja Burke 2001, Luostarinen ja Pyykkönen 2013).

Reaktorit voidaan jakaa syötteen kuiva-ainepitoisuuden perusteella märkäprosessireaktoreihin (kuiva-ainetta < 15 %, yleensä < 12 %) ja kuivaprosessireaktoreihin (kuiva-ainetta > 15 %, yleensä 25–40 %). Kuivaprosessireaktori on yleensä panostoiminen tai tulppavirtaukseen perustuva (Latvala 2009). Panostoimisessa reaktorissa sekoittaminen tapahtuu yleensä kierrättämällä prosessista vapautuvaa nestettä kuivan biomassan ympärillä. Vertikaalisessa tulppavirtausreaktorissa sekoittaminen tapahtuu syöttämällä uutta materiaalia reaktoriin. Sekoitus ei välttämättä ole riittävä, jolloin kaasun vapautuminen voi estyä. Horisontaalisissa tulppavirtausreaktoreissa on yleensä sekoitin. Märkäprosessi on yleensä jatkuvasekoitteinen. Reaktori on korkea ja pysty tai osittain maan pinnan alla oleva laakeampi reaktori (Lehtomäki ym. 2007, Luostarinen ja Pyykkönen 2013).

Märkäprosessissa tarvitaan jälkikaasuallas ohi virtaavan biokaasun talteenottoon. Se on energiataloudellisesti järkevää, koska jälkikaasuallas tuottaa jopa neljänneksen laitoksen kaasusta (Luostarinen ja Pyykkönen 2013). Kuivaprosessissa jälkikaasua ei yleensä kerätä. Biokaasulaitoksen yhteyteen tarvitaan myös biokaasun ja mädätteen varasto sekä biokaasun hyödyntämiseen tarvittavat laitteet. Tarvittavia laitteita voivat olla muun muassa lämmön- ja sähkön tuotantoyksiköt (Lehtomäki ym. 2007, Luostarinen ja Pyykkönen 2013).

2.4.2 Biokaasulaitoksen energian tuotto

Biokaasulaitoksen energian tuottoa kuvaavat syötteiden metaanintuottopotentialit (Lesteur ym. 2010) (taulukko 1). Pyykkösen ym. (2013) mukaan lietelannasta separoidun kuivajakeen metaanintuottopotentiali tuoretonnia kohti on liki nelinkertainen lietelantaan verrattuna. Kuljettamalla pelkkää kuivajaetta, saataisiin siis kuljetettua tuoretonnia kohti lähes nelinkertainen määrä energiaa kerralla.

Luostarisen (2013) ja Ricon ym. (2012) mukaan naudan lietteestä separoidun kuivajakeen metaanintuottopotentiali on noin $260 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$. Lannan metaanintuottopotentialiin vaikuttavat muun muassa eläimen ruokinta sekä lietelannan ja kuivajakeen viipymä väli-varastossa ennen biokaasulaitosta (Luostarinen 2013).

Taulukko 1. Muutamien yleisien biokaasulaitoksen syötteiden metaanintuottopotentiaalit (BMP). Muokattu lähteistä Steffen (1998) ja Suomalainen (2007), Hutnan (2009), Pyykkönen (2013).

Raaka-aine	BMP (m ³ /t/VS)	BMP (m ³ /t/tp)	TS %	VS/TS %	CH ₄ -pit.	C/N-suhde	Lähde:
Naudan lietelannasta	206	38 - 44	16-30 %	90 %	-	-	Pyykkönen ym. (2013)
Naudan lietelanta	200-300	10-20	5-13 %	75-85%	55-75 %	6-20	Pyykkönen ym. (2013), Steffen ym. (1998), Suomalainen (2007)
Sian lietelanta	250-500	10-40	3-8 %	70-80%	70-80 %	3-10	Steffen ym. (1998)
Säilörehu	306-560	72-140	15-35 %	90 %	-	10-25	Pyykkönen ym. (2013), Steffen ym. (1998).
Olki	350-450	245-315	70 %	90 %	-	90	Steffen ym. (1998)
Hera	355	10-20	1-5 %	80-95%	60-80%	-	Steffen ym. (1998)
Maissi	310-410	-	35 %	-	55 %	-	Hutnan ym. (2009)
Ruokajäte	300-600	30-60	10 %	80 %	70 - 80 %	-	Steffen ym. (1998)

tVS = 1000 kg orgaanista ainetta, tp = tuorepaino, TS = kuiva-ainepitoisuus, VS/TS = orgaanisen aineen osuus kuiva-aineesta, CH₄-pit = metaanipitoisuus, C/N-suhde = hiili/typpi-suhde.

2.4.3 Biokaasulaitoksen lopputuotteiden hyödyntäminen

Biokaasuprosessissa syntyy aina kahta lopputuotetta: biokaasua ja mädätysjäännöstä. Biokaasu voidaan muuttaa lämmöksi tai CHP-yksiköllä sähköksi ja lämmöksi. Puhdistamalla biokaasusta epäpuhtaudet, kuten hiilidioksidi ja rikkivety, saadaan biometaanina (CH₄-pitoisuus > 90 %), jota voidaan käyttää liikennepolttoaineena paineistus- ja tankkausyksikön kanssa (Luostarinen ja Pyykkönen 2013).

Mädätysjäännös voidaan levittää takaisin peltoon. Mädätysprosessi parantaa typen käytökelpoisuutta kasveille, sillä ammoniumtyppi on nopeammin kasvien käytössä ja vastaa prosessin jälkeen liukoisuudeltaan epäorgaanista typpilannoitetta (Lehtomäki ym. 2006). Fatiman (2015) tekemän katsauksen mukaan liukoista typpeä (NH₄-N) on mädätysjäännöksessä noin 10–30 % enemmän kuin raakalietteessä. Tässä tutkimuksessa on käytetty arvoa 20 %.

2.5 Biokaasulaitoksen kannattavuus

Maatilan biokaasulaitoksen kannattavuus muodostuu tuotetusta energiasta, joka joudutaisiin muuten ostamaan tilan ulkopuolelta (Winqvist ym. 2015). Toinen kannattavuuteen

vaikuttava tekijä on liukoisen typen määrän kasvu mädätteessä. Separoinnin ja kuivajakeen kuljetuksen kannattavuus muodostuu liukoisen typen määrän kasvusta ja energian tuoton määrän kasvusta verrattuna pelkkään lietalantaan syötteenä.

Winquistin ym:n (2015) laskelmien mukaan tilakohtainen biokaasulaitos osoittautui öljy- ja hakelämpölaitosta kannattavammaksi, kun biokaasulaitokselle saatiin 35 % investointituki.

Viiden tilan välisessä yhteisessä biokaasulaitoksessa takaisinmaksuaika oli lyhin (6,8 v), kun biokaasu hyödynnettiin liikennepolttoaineena ja lämmöntuotannossa. Tällöin biokaasulaitokseen toimitettiin kolmelta tilalta kuivajakea ja kaikilta tiloilta hävikkirehu käytettiin biokaasulaitoksessa. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa takaisinmaksuaika oli 7,3 vuotta, kun kaikki lämpö saatiin hyötykäyttöön (Winquist ym. 2015). Kaiken lämmön hyötykäyttö edellyttää lähellä olevaa suurta lämmön tarvitsijaa.

2.6 Yhteenveto kirjallisuudesta

Biokaasun tuotannosta oli saatavilla tietoa runsaasti englannin ja suomen kielellä. Biokaasuntuotannon raaka-aineiksi käyvät käytännössä kaikki muut eloperäiset raaka-aineet paitsi puu. Kotieläintilan ravinteiden kiertoa saadaan tehostettua, koska typpeä muuttuu kasvien kannalta liukoisempaan muotoon prosessin aikana. Biokaasulaitoksen kannattavuus koostuu ravinnehyötyjen lisäksi korvatusta ostoenergiasta. Tuotettu energia voidaan käyttää lämpönä, sähkönä tai liikennepolttoaineena. Uusia biokaasulaitteita kehitetään koko ajan yleisen kiinnostuksen ja tietämyksen lisääntyessä, ja kotieläintiloille sopivien laitteistovaihtoehtojen määrä kasvaa jatkuvasti. Laitteistovalinnasta riippumatta biokaasulaitoksen energian tuottoon vaikuttavat syötetyt materiaalit ja niiden biokaasuntuotto-potentiaali.

Kirjallisuudesta löytyi paljon tietoa säilörehun käytöstä biokaasulaitoksissa, mutta vain muutamassa julkaisussa kerrottiin kuivajakeen käytöstä biokaasulaitoksessa. Yhdestäkään julkaisusta ei löytynyt kauempaa tuodun syötteen lisäarvon laskentaa eikä tästä johdettua kannattavaa kuljetusetäisyyttä.

3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Suomessa ei hyödynnetä lannan potentiaalia energian tuotannossa ja lannoituksessa maksimaalisesti. Biokaasuprosessilla voidaan parantaa typen käyttökelpoisuutta kasveille sekä tuottaa metaanikuutiota kohden noin 10 kWh energiaa (Luostarinen 2013). Suomessa on tarve kehittää biokaasutuotannon kannattavuutta, jotta biokaasun tuotannon houkuttelevuutta voitaisiin lisätä. Lantaa syntyy nautatiloilla noin 25 m³/nauta/v (Moffit 1999). Naudan vuodessa tuottaman lannan teoreettinen metaanintuottopotentialiaali on noin 3000 kWh (Pyykkönen ja Luostarinen 2013). Lihasika tuottaa lietelantaa noin 2 m³/eläin/v (BMP noin 500 kWh), broileri kuivalantaa 0,03 m³/eläin/v (BMP noin 2 kWh) (ASABE Standards 2005) ja lammas kuivalantaa 1 m³/eläin/v (BMP noin 400 kWh) (Ogejo ym. 2010). Kuivajakeen energiantuottopotentialiaali on Pyykkösen ja Luostarisen (2013) mukaan noin 440 kWh/t separoitua tuoremassaa, joka on liki nelinkertainen liete- lantaan verrattuna. Siksi päätettiin tutkia, voidaanko biokaasulaitosten kannattavuutta pa- rantaa käyttämällä separoitua kuivajakea biokaasulaitoksen syötteenä rehun sijasta. Tut- kimuksen tavoitteet olivat seuraavat:

Tavoite 1 oli selvittää lannan kuivajakeen käyttömahdollisuus biokaasulaitoksessa säilö- rehun sijasta. Tarkoitus oli selvittää kuivajakeen optimaalinen syöttömäärä kaasun netto- tuoton kannalta. Lisäksi laskettiin kuivajakeen kannattava kuljetusetäisyys. Etäisyyden avulla oli mahdollista arvioida ravinteiden alueellista kiertoa.

Tavoite 2 oli selvittää reaktorin sekoitustehon ja sekoitustavan vaikutus metaanin tuot- toon ja biokaasulaitoksen energiataseeseen.

Tutkimushypoteesit:

1. Separoitu kuivajake on teknisesti käyttökelpoinen lisäsyöte lietelantaa perussyöt- teenään käyttävässä biokaasulaitoksessa.
2. Lähimaatiloilta biokaasulaitokselle kuljetettavan kuivajakeen käyttö lisäsyötteenä on taloudellisesti kannattavaa verrattuna säilörehun käyttöön syötteenä.

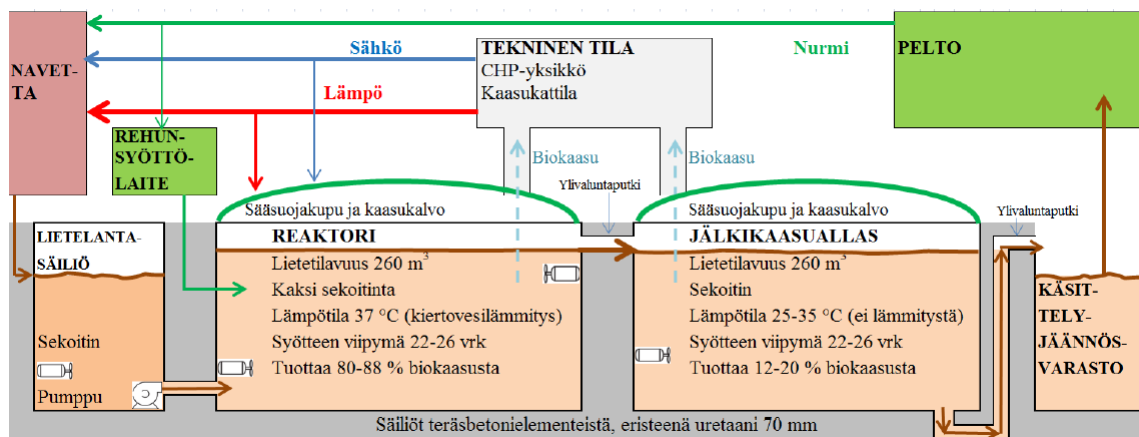
3. Mekaanisen sekoituksen tauotus vaikuttaa positiivisesti biokaasulaitoksen energiataseeseen ja kannattavuuteen.
4. Kaasusekoitus kuluttaa vähemmän sähköä verrattuna mekaaniseen sekoitukseen ja se on taloudellisesti kannattavaa.

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

4.1 Maaningan koetila ja biokaasulaitos

Luonnonvarakeskuksella (Luke) on Maaningan koetilalla noin 120 lypsylehmää ja sinne on rakennettu lypsynavetan yhteyteen maatilakokoluokan biokaasulaitos vuonna 2009 (Pyykkönen ja Luostarinen 2013). Biokaasulaitos on varustettu tutkimuskäyttöön muun muassa jatkuvatoimisilla mittalaitteistoilla.

Maaningan biokaasulaitos on mitoitettu prosessoimaan 3500 m³ lietelantaa sekä enintään 300 tonnia kasvibiomassaa. Laitoksen on rakentanut Metener Oy (Metener 2017). Laitoksen perussyötemateriaalina on koenavetasta saatava lehmän lietelanta. Maaningan biokaasulaitokseen kuuluu reaktori, jälkikaasuallas, esisäiliö, mädätteen varasto sekä kaasun käyttöyksiköt (kuva 5).



Kuva 5. Maaningan biokaasulaitoksen kaaviokuva. Biokaasulaitoksen toimintaan kuuluu reaktori, jälkikaasuallas, esisäiliö, kuivan aineen syöttölaitteisto, kaasukattila, CHP -yksikkö sekä käsittelyjäännöksen varasto. Kuvan käyttämiseen on saatu tekijän lupa.

Lietelantaa syötetään esisäiliöstä pumpun avulla noin 10 m³/vrk. Lieke syötetään tasaisin väliajoin kolme kertaa päivässä reaktorin pohjalle. Hyvin kuiva-ainepitoinen (> 15 %)

syötemateriaali eli tässä tutkimuksessa kuivajae syötetään suoraan reaktoriin syöttösupin pohjalla olevan syöttöruuvien avulla. Syöttöruuville kuivajae putoaa täyttöpöydältä (valmistaja LH-Tuote Oy). Reaktori on 300 m³:n (nestetilavuus 260 m³) suuruinen betoniallas ja se on eristetty 70 mm polyuretaanilevyillä. Reaktorissa on kaksi upposekoitinta (Eisele GTWSB 1040, 7,5 kW ja CRI-MAN TBM 7,5/4, 7,5kW). Reaktoria voidaan sekoittaa myös lamellikompressorilla paineistetulla kaasulla reaktorin pohjaan asennettujen suuttimien kautta. Tässä tutkimuksessa tutkittiin upposekoittimien tauottamista ja kaasusekoittimen käytön vaikutusta biokaasulaitoksen energiataseeseen.

Reaktorista mädätysjäätös siirretään uuden materiaalin pumppauksen jälkeen pumpulla (Nicolini & C, RN 112 A4, 4 kW) jälkikaasualtaaseen. Jälkikaasuallas eroaa reaktorista siten, että siinä on vain yksi propellisekoitin (Eisele GTWSB 1040, 7,5 kW) eikä allasta lämmitetä. Reaktorin lämpötila pidetään 37 °C ±1 °C lämpötilassa. Reaktoria täytyy lämmittää, sillä anaerobinen hajoaminen ei juurikaan tuota lämpöä (Luostarinen ja Pyykkönen 2013). Reaktorin ja jälkikaasualtaan päällä on kaksikerroksinen tiivis muovikate. Jälkikaasualtaasta käsittelyjäätös pumpataan varastoaltaaseen.

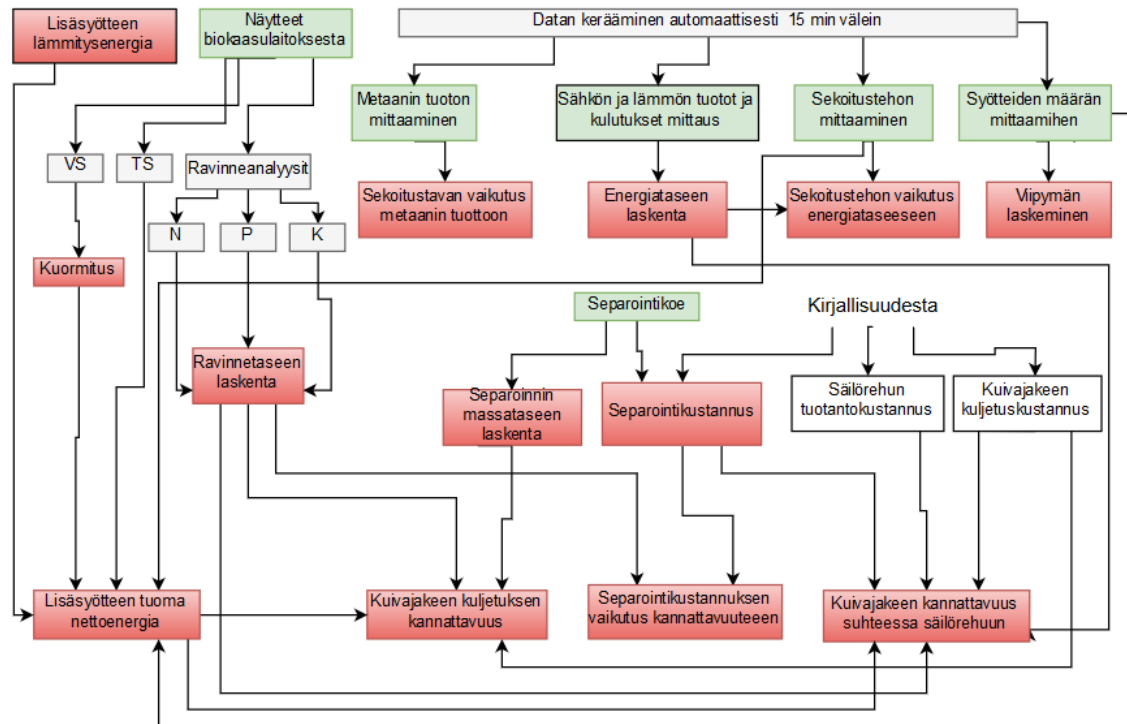
Kaasu hyödynnetään tilalla 80 kW:n kattilan avulla (Jäspi, poltin Oilon) lämpönä tai 63 kW:n CHP-yksikön (Powertherm 20, Saksa) avulla sähköinä ja lämpönä. Tuotteilla korvataan hakelämpöä ja ostosähköä. Sähkön ja lämmön tuotannon suhde riippuu ostosähkön ja ostolämmön hinnasta.

4.2 Tutkimuksen osa-alueet

Kuvassa 6 on esitetty tämän tutkimuksen osa-alueet ja koejärjestely. Tutkimuksen alussa testattiin sopivaa kuivajakeen syöttömäärää. Kun biokaasuprosessi saatiin vakiinnutettua viikolla 11, tutkimus koostui kolmesta vaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa (viikot 11–14) tutkittiin reaktorin jatkuvaa sekoitusta upposekoittimilla. Toisessa vaiheessa (viikot 15–18) tutkittiin reaktorin tauotettua sekoitusta upposekoittimilla. Kolmannessa vaiheessa (viikot 19–20) tutkittiin reaktorin sekoitusta tuotetulla kaasulla.

Tutkimuksen aikana mitattiin syötteiden määrät (lietelanta m³/vrk ja kuivajae t/vrk), sekoitukseen käytetty energia (kWh), sähkön- ja lämmöntuotot (kWh), sähkön- ja lämmönkulutukset (kWh) sekä metaanin tuotot ja kulutukset (m³/15 min). Lisäksi kerättiin näyt-

teitä kuormituksen ja kuiva-ainepitoisuuden määrittämiseksi sekä ravinneanalyyseja var-
ten. Näytteitä otettiin raakaliitteestä, reaktorista ja mädätysjäännöksestä. Lietenäytteistä
mitattiin myös pH (mittari: pH VWR pH-100, VWR International bvba, Leuven, Belgia).
Mittarin erottelukyky oli pH-yksikön sadasosa.



Kuva 6. Tutkimuksen osa-alueet sekä suoritettavat mittaukset ja laskut. Vihreällä pohjalla ovat tutkimuksen aikana mitatut asiat. Tutkimuksen aikana lasketut arvot ovat punaisella pohjalla. Kirjallisuudesta otetut arvot ovat valkealla pohjalla. Viivoilla on merkitty reitit, joiden kautta arvoihin on päästy.

Mitatusta arvoista laskettiin sekoitustavan vaikutus metaanin tuottoon, energiatase, sekoitustehon vaikutus energiataseeseen, kuormitus, viipymä ja ravinnetaseet (NPK). Tämän jälkeen separointikokeen perusteella laskettiin separoinnin massatase ja separointikustannus. Kirjallisuuden perusteella laskettiin säilörehun tuotantokustannus ja kuivajakeen kuljetuskustannus. Saaduista tuloksista laskettiin lisäsyötteen tuoma nettoenergia, kuivajakeen kuljetuksen kannattavuus, separointikustannusten vaikutus kannattavuuteen sekä kuivajakeen käytön kannattavuus suhteessa säilörehuun.

Mittaustietoa kerättiin koko tutkimuksen ajan Excel-tilukkolaskentaohjelmaan. Ohjelmaa käytettiin datan yksinkertaistamiseen tekemällä päivä- ja viikkokohtaiset pivot-tau-

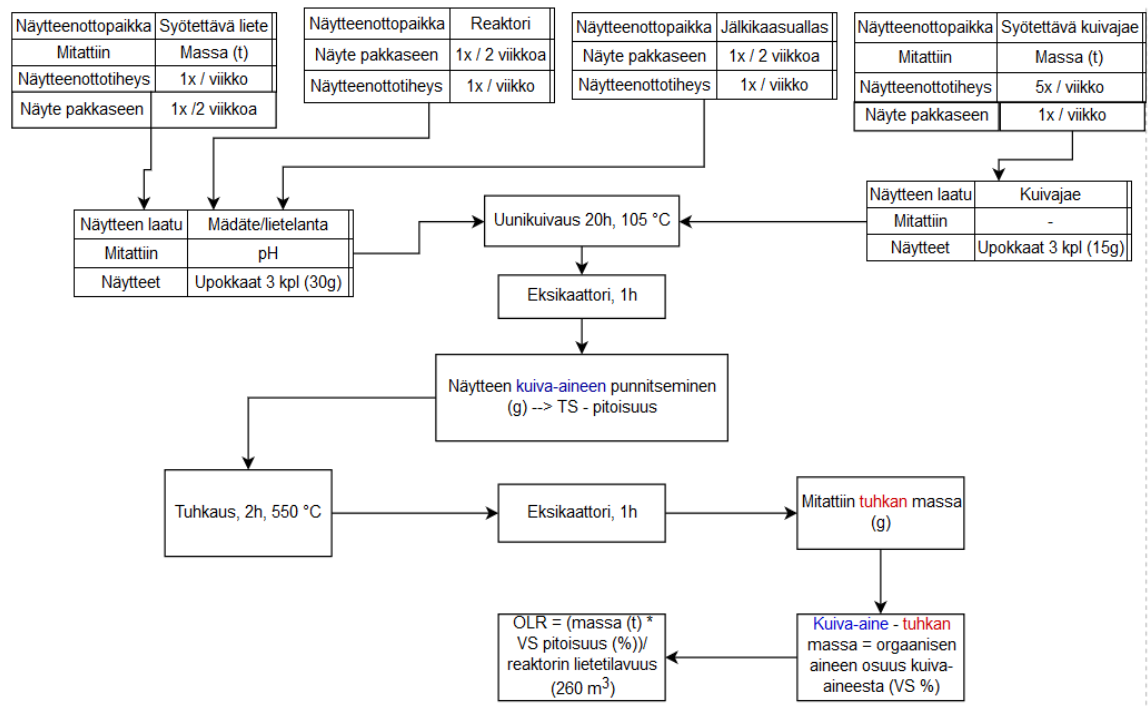
lukot mitatuista arvoista, sillä päiväkohtaiset vaihtelut olivat melko suuria. Pivot-taulukoista tehtiin tutkimuksen tunnuslukuja selkeyttäviä kaavioita sekä laskettiin kannattavuuslaskuihin ja taseisiin tarvittavat arvot (kuva 6).

Tuloksista laskettiin syötteille, kuiva-ainepitoisuuksille sekä energiantuotoille ja -kuluksille keskiarvot, minimi, maksimi, keskihajonnat ja keskiarvon keskivirheet. Laskennat tehtiin erikseen tutkimuksen kolmelle eri vaiheelle. Odotusarvon keskimääräistä poikkeamaa kutsutaan keskihajonnaksi. Keskivirhe on keskihajonta jaettuna otoskoon neliöjuurella. Keskivirhe kuvaa otannan hajontaa (Karjalainen 2010).

4.3 Mittauslaitteisto

4.3.1 Kuormituksen mittaaminen

Orgaaninen kuormitus (OLR, Organic Loading Rate) kuvaa prosessiin päivittäin syötetyn orgaanisen aineen määrää. Orgaanisen kuormituksen laskemiseksi täytyy selvittää orgaanisen aineen osuus kuiva-aineesta (VS) (kuva 7). Orgaanisen aineen määrää mitataan, koska orgaaninen aines nostaa kaasun tuottoa, mutta toisaalta liian korkea OLR voi aiheuttaa välituoteinhibitiota (Mata-Alvarez ym. 2000).



Kuva 7. Reaktorin orgaanisen kuormituksen laskemisen vaiheet. Orgaanisen aineen osuus (VS %) määritettiin kerran viikossa ja kuiva-ainepitoisuudelle määritettiin päivakohtainen keskiarvo. Syötemassat mitattiin syötettäessä massaa reaktoriin (lietelanta 3 kertaa päivässä, kuivajae kerran päivässä)

TS-pitoisuus (Total Solids, kuiva-aine) määritettiin gravimetrisesti 105 °C:ssa prosessin tunnuslukujen tutkimista varten lietelantasyötteestä kaksi kertaa viikossa, kuivajae- syötteestä ja mädätysjäännöksestä 12 kertaa viikossa. Orgaaninen aine (VS, Volatile Solids, orgaaninen kuiva-aine) määritettiin gravimetrisesti 550 °C:ssa TS-määritysten yhteydessä lietelannasta, kuivajakeen viikkokokoonnista ja mädätysjäännöksestä kerran viikossa. Näyte otettiin käsin pieneen purkkiin kuivajakeen syötön yhteydessä. Määritykset tehtiin standardin SFS 3008 (1990) mukaisesti.

Orgaaninen kuormitus laskettiin kaavalla 1:

$$OLR = \frac{m \times c}{V_r} \quad , \quad (1)$$

jossa

OLR = orgaaninen kuormitus (kgVS/m³vrk)

\dot{m} = syötteen massavirta (t/vrk)

c = syötteen VS-pitoisuus (%)

V_r = reaktorin lietetilavuus (m³)

Jokaisesta näytteestä tehtiin määritykset kolmena kerranteena. Raakalietteestä ja käsitte-lyjäännöksistä tehtyjen näytteiden massat olivat noin 30 g ja kuivajakeesta noin 15 g. Näytteet kuivattiin kuivausuunissa 105 °C:ssa noin 20 tunnin ajan (SFS 1990). Tämän jälkeen näytteet laitettiin eksikkaattoriin tunniksi. Jäänyt materiaali mitattiin vaa'alla (Sartorius Ag, ED153-CW, Saksa, 0,001g) ja tulos oli näytteen kokonaiskuiva-aineen määrä (TS-pitoisuus).

Tämän jälkeen samat näytteet laitettiin orgaanisen aineen määrittystä varten tuhkausuu-niin (Heraeus MR 260 E, Saksa) 550 °C:een lämpötilaan noin kahden tunnin ajaksi, minkä jälkeen ne asetettiin tunniksi eksikkaattoriin jäähtymään. Jäljelle jääneen tuhkan avulla saatiin laskettua alkuperäisen näytteen orgaanisen aineen määrä vähentämällä kuiva-aineen massasta tuhkan massa.

Tutkimuksen aikana otettiin pakastimeen (Electrolux EC4200A 0W1, -21 °C) noin litran suuruiset näytteet lietteistä kahden viikon välein sekä kuivajakeesta koontinäyte kunkin viikon viidestä näytteestä. Osa näytteistä lähetettiin ravinneanalyysiin Ahma ympäristö Oy:lle. Ravinneanalyysissä määritettiin jakeen tilavuuspaino (kg/m^3), kokonaistyyppi (ka-talyttinen poltto H_2SO_4 , Kjeldahlin menetelmä, FIA), liukoinen typpi ($\text{NH}_4\text{-N}$ ja $\text{NO}_3\text{-N}$ summa, uutettiin lantanäytteestä 2 M HCl :n ja 2,5 M CaCl_2 :n seoksella, uutteesta spekt-rofotometrisesti FIA-tekniikalla), fosfori (mikroaaltoavusteinen HNO_3 märkäpoltto (EPA3051), ICP-OES) ja kalium (mikroaaltoavusteinen HNO_3 märkäpoltto (EPA3051), ICP-OES).

4.3.2 Viipymän mittaaminen

Viipymä kertoo syötemateriaalin keskimääräisen viipymän reaktorissa ja jälkikaasutus-altaassa (Al Seadi 2001). Maaningan koetilan navetta tuottaa lantaa noin $3500 \text{ m}^3/\text{v}$, joten päivittäinen syötemäärä on noin $10 \text{ m}^3/\text{vrk}$. Oletetaan, että syötteen tilavuuspaino on 1000 kg/m^3 . Hydraulinen viipymä (HRT) on reaktorin tilavuuden ja syötteen tilavuusvirran suhde (kaava 2). Viipymän yksikkö on päivien lukumäärä vrk.

$$HRT = \frac{V_r}{V} \quad , \quad (2)$$

jossa

HRT = hydraulinen viipymä (vrk)

V_r = reaktorin lietetilavuus (m^3)

V = syötteen tilavuusvirta (m^3/vrk)

4.3.3 Metaanin tuoton mittaaminen

Reaktorissa muodostuva kaasu ohjataan teknisessä tilassa olevaan virtaamamittariin (kuva 5). Virtaamamittarina toimii paljekaasumittari (G4 1-YHT Elster, Saksa). Virtaus mitataan 15 minuutin välein. Mittarilta kaasu ohjataan jälkikaasualtaaseen, jossa se sekoittuu jälkikaasualtaan kaasun kanssa. Jälkikaasualtaasta kaasu ohjataan kosteudenpoistoa varten kondenssikaivoon. Tämän jälkeen kaasu palaa kaasunkulutusmittarin (G4 1-YHT) kautta tekniseen tilaan.

Reaktorin ja jälkikaasualtaan seoskaasun kulutus mitataan toisella paljekaasumittarilla (BK-G25, Elster, Saksa) kaasukattilassa tai CHP-yksikössä (kuva 5). Jälkikaasualtaassa muodostuneen kaasun määrä saadaan, kun vähennetään kaasun kokonaistuotosta reaktorissa tuotetun kaasun määrä. Kaasun metaanipitoisuus mitattiin (Simrad GD10P, Norja, Simtronics, tarkkuus $\pm 5\%$) kaasumittarilla.

Mittareilta saadaan arvoksi kuutiometrejä (m^3), jotka täytyy muuttaa normaalikuutiometreiksi (kaava 3):

$$V_2 = \frac{P_1 \times V_1 \times T_2}{T_1 \times P_2}, \quad (3)$$

jossa

V_2 = kaasun tilavuus (Nm^3)

P_1 = ilmanpaine ulkona + biokaasureaktorin lisäpaine (kPa)

V_1 = paljekaasumittarin mittaama kaasun tilavuus (m^3)

T_2 = kaasun lämpötila NTP-olosuhteissa (K)

T_1 = paljekaasumittarin lämpötila (K)

P_2 = kaasun paine NTP-olosuhteissa (kPa)

Normaalikuutiometrillä tarkoitetaan kaasun tilavuutta 101,3 kPa paineessa ja 0 °C lämpötilassa. Ulkoilman lämpötila- ja ilmanpainetiedot saatiin Ilmatieteen laitoksen (2018) avoimesta datasta. Kaasunpaine virtaamamittareilla laskettiin lisäämällä ilmanpaineeseen sääsuojakuvun (reaktori tai jälkikaasuallas) lisäpaine (n. 100–200 Pa). Paljekaasumittareiden lämpötila mitattiin niiden kylkeen styrox-eristeen alle sijoitetuilla dataloggereilla (Onset HOB0 UX100-001).

4.3.4 Reaktorin sekoitustehon mittaaminen

Tutkimuksessa energiantuotannon taseita varten tutkittiin kolmea eri sekoitusvaihtoehtoa. Vaihtoehdot olivat jatkuva sekoitus (vaiheessa 1), tauotettu sekoitus (vaiheessa 2) sekä jatkuva kaasusekoitus (vaiheessa 3).

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa sekoitus oli jatkuvaa. Sekoitus tapahtui reaktorissa kahdella upposekoittimella ja jälkikaasualtaassa yhdellä upposekoittimella. Energian kulutus mitattiin sekoittimien taajuusmuuttajien kWh-mittareilla (Vacon HVAC, vaconN0100-3L-0023-4-HVAC+DLFI ja Vacon, NXL00235c2H1SSS0000).

Tutkimuksen toisessa vaiheessa sekoitusta tauotettiin. Sekoituksessa käytettiin samoja laitteita kuin ensimmäisessä vaiheessa, mutta sekoittimien pyöriminen pysäytettiin aika ajoin. Tauotetun sekoituksen aikana sekoitettiin yhtäjaksoisesti 10 minuuttia ja sen jälkeen pidettiin 20 minuuttia taukoa. Energian kulutus mitattiin kWh-mittareilla, jotka oli sijoitettu sekoittimien taajuusmuuttajiin.

Tutkimuksen kolmannessa vaiheessa käytettiin kaasusekoitusta. Lamellikompressorilla (BEVI, 4A2 132S-4B3) paineistettua biokaasua johdettiin reaktoriin ja jälkikaasualtaaseen biomassan sekoittamiseksi. Sekoitus oli jatkuvaa. Kaasusekoituksen energian kulutus mitattiin kWh-mittarilla.

4.3.5 Biokaasulaitoksen energiataseen laskenta

Energiataseella voidaan arvioida energiantuotannon tehokkuutta. Energiatase kuvaa sitä, kuinka paljon energiaa saadaan suhteessa kulutettuun energiaan. Energiataseen laskentaa varten mitattiin laitoksen tuottama kaasumäärä sekä laitoksen toimintoihin kuluva energiamäärä. Energiatase laskettiin jakamalla tuotettu energia energiankulutuksella. Kaasun energiasisällön laskennassa käytettiin arvoa 10 kWh/Nm³ metaania (Luostarinen 2013).

4.3.6 Separoinnin ravinne- ja massataseen laskenta

Ravinnetaseella tarkoitetaan systeemiin tulevan ravinnemäärän ja siitä lähtevän ravinnemäärän erotusta (Mavi 2008). Separoinnissa syntyvän kuivajakeen tuoremassa laskettiin kuiva-ainepitoisuuksien perusteella (kaava 4). Nestejakeen tuoremassa saatiin vähentämällä kuivajakeen tuoremassa lietelannan tuoremassasta. Separointikoe tehtiin Maaninalla 6.7.2016. Separoinnin aikana kerätyt näytteet lähetettiin Suomen ympäristöpalveluiden laboratorioon ravinneanalyysiin. Näytteistä saaduista tuloksista laskettiin typen, fosforin ja kaliumin osuudet neste- ja kuivajakeessa. Ravinne- ja massataseet määritettiin kokonaistypelle, liukoiselle typelle, fosforille ja kaliumille. Separoinnin ravinne- ja massatase määritettiin laskemalla lietettä separoitaessa nestejakeeseen ja kuivajakeeseen erottuvat massat ja määrittämällä näiden ravinnemäärät. Ravinnetaseet saatiin vertaamalla massoja separoimattoman mädätteen arvoihin.

$$m_{kuiva} = \frac{(TS_{lanta} - TS_{neste})}{TS_{kuiva} - TS_{neste}} \times m_{lanta}, \quad (4)$$

jossa

m_{kuiva} = separoidun kuivajakeen tuoremassa (FM) (kg)

TS_{lanta} = separoitavan lietelannan TS (%)

TS_{neste} = syntyneen nestejakeen TS (%)

TS_{kuiva} = syntyneen kuivajakeen TS (%)

m_{lanta} = separoitavan lietelannan tuoremassa (kg)

4.3.7 Metaanintuottopotentialien määrittäminen

Biokaasulaitoksen syötteiden biokemialliset metaanintuottopotentialit (BMP:t) määritettiin Luken Jokioisten laboratoriossa 39 vrk pituisella panoskokeella. Ennen metaanintuottopotentialien määrittämisen aloittamista pullot ja letkut huuhdeltiin typpikaasulla, jolloin olosuhteet saatiin hapettomiksi.

Metaanintuottopotentialien määrittäminen suoritettiin kolmena samanaikaisena kerranteena. 500 ml:n lasipulloihin laitettiin mikrobiympyriä 260 g ja lisättiin näytettä sen verran, että saatiin kaikille kerranteille sama määrä orgaanista kuiva-ainetta. Tällöin näytteen ja ympin VS/VS suhde oli 0,75. Tämän jälkeen näytepullot täytettiin ionivaihdetulla vedellä

400 ml nestetilavuuteen, jotta saatiin vakioitua orgaanisen kuiva-aineen pitoisuudet. Näytteiden pH:n puskuroimiseksi näytteisiin lisättiin 3 g/l natriumkarbonaattia (NaHCO_3), jolloin kaikkien näytteiden pH oli yli 7,2. Tämän jälkeen pullot suljettiin kaasutiiviisti ja pulloissa syntynyt biokaasu johdettiin letkua pitkin hiilidioksidin poistoyksikköön. Hiilidioksidin poisto toteutettiin sitouttamalla hiilidioksidi natriumhydroksidin kanssa. Jäljelle jäänyt metaani johdettiin kaasuntilavuusmittaukseen.

4.3.8 Säilörehun tuotantokustannusten määrittäminen

Säilörehukustannusta ja kuivajakeen käytön kustannusta verrattiin keskenään. Säilörehukustannuksia määritettiin kirjallisuuden perusteella säilörehun tuotannolle sekä hävikkirehun käytölle. Taavitsaisen (2011) mukaan säilörehun tuotantokustannukset ovat hehtaarille noin 1050 €/ha. Laskelmassa on määritetty, että energianurmelta saadaan satoa 5300 kg/kuiva-ainetta hehtaarilta (19,8 snt/kg kuiva-ainetta). ProAgrian (2011) tekemässä tutkimuksessa säilörehun keskimääräinen tuotantokustannus oli 19,1 snt/kg kuiva-ainetta. Kustannukset ovat erittäin lähellä toisiaan. Säilörehun metaanintuottopotentiaa-
liksi on arvioitu Luostarisen ym. (2013) mukaan $326 \text{ Nm}^3/\text{tVS}$.

Hävikkirehun kustannus määritettiin Kässin ja Seppälän (2012) tulosten perusteella. He laskivat hävikkirehun hinnaksi 12 snt/kg kuiva-ainetta, kun kuiva-ainesato oli 7500 kg/ha. Se on 63 % biokaasuprosessia varten tuotetun nurmisäilörehun hinnasta. Osa hintaerosta johtuu Kässin ja Seppälän (2012) käyttämästä suuremmasta kuiva-aine sadosta hehtaaria kohti (7500 kg/kuiva-ainetta).

4.4 Separointikustannukset

Separoinnilla saavutetaan logistiikkahyötyjä (Arkima 2015). Separointikustannukset laskettiin yhdelle sähkömoottorikäyttöiselle Bauer S655 -ruuviseparaattorille. Kyseisessä separaattorissa on 5,5 kW sähkömoottori ja käytettävissä on 0,5 mm:n seula. Ruuviseparaattorin toiminta perustuu paineeseen ja kuivajakeen kuiva-ainepitoisuutta säädellään muuttamalla puristusvoimaa.

Kiinteisiin kustannuksiin laskettiin yksi separaattori, lietepumppu sekä kuivajakeen säilöntätilan kustannus. Kustannuksesta vähennettiin lietesäiliön tarpeen pieneneminen. Muuttuviin kustannuksiin laskettiin työ-, kunnossapito-, sähkö- ja ylläpitokustannukset.

Kiinteä vuotuinen investointikustannus laskettiin annuiteettimenetelmällä (kaava 5). Varastotilan määrä laskettiin kahden kuukauden tarpeeksi, jotta tilalle tuotavaa ja tilalta vietävää kuivajaetta on helppo käsitellä erillään, vaikka separoitava määrä olisi pienempi. Kertomalla kertyvien kuiva-aine tonnien määrä 0,6:lla saatiin tarvittava kuivalantalan pinta-ala (Hellstedt 2009). Yksikkökustannuksena käytettiin Maa- ja metsätalousministeriön ohjeellisia yksikkökustannuksia (Finlex 2005). Laskennassa käytetyt oletukset on esitetty taulukossa 2. Oletettiin myös, että raakalietteen erotustehokkuus oli sama kuin mädätysjäännöksen eli 10 %. Separoitava määrä 730 t/v tarkoittaa Maaningan koetilalla sitä, että tuleva ja vietävä mädäte separoidaan, jotta massan liikuttaminen samalla kalustolla edestakaisin olisi mahdollisimman helppoa.

$$PMT = PV * \frac{\frac{r}{100}}{1 - (1 + \frac{r}{100})^{-t}} \quad (5),$$

jossa

PMT = jokaiseen vuoteen kohdistuva kustannus (€)

PV = investointikustannus (€)

r = laskentakorkokanta (%)

t = investoinnin käyttövuosien lukumäärä (v)

Taulukko 2. Separointikustannusta laskettaessa käytettyjä lähtöarvoja.

Separointikustannusten lähtöarvoja		
Laiteinvestointi (Bauer S655)	30000 €	Pyykkönen (2013)
Oman pääoman korkovaatimus	4 %	
Ylläpitokustannukset (%/v)	2 %	Kässi ym. (2013)
Separaattorin pitoaika (v)	12 v	Kässi ym. (2013)
Kuivalantalan ja lietesäiliön kesto aika (v)	20 v	
Lietepumpun hankintakustannus (€)	5000 €	
Kuivajakeen säilöntä tilan tarve (m2/t)	0,6 m2/t	Palva (2009)
Kuivajaetta (t/ 2 kk)	60 t/2kk	
Kuivajakeen säilöntä ala (m2)	36 m2	
Metrin korkuinen kuivalantala (m3)	36 m3	
Kuivalantalan ohjekustannus (€/m3)	23 €/m3	Finlex (2013)
Lietealtaan vähenemisen hyöty (€/m3)	22 €/m3	Finlex (2013)
Sähkön siirtohint (€/kWh)	6,0 snt/kWh	
Sähkön hinta (€/kWh)	4,0 snt/kWh	
Separoitava määrä (t/v)	730,0 t/v	

4.5 Kuivajakeen kuljetuskustannuksien ja ravinteiden arvon määrittäminen

Palvan (2015) mukaan lannan kuljetuskustannus on 57 €/h. Arvo perustuu urakoitsijoilta saatuun tietoon. Lisäksi kustannuksissa huomioitiin lannan kuormaus- ja purkukustannus (taulukko 3). Kustannukset laskettiin 2 viikon välein tapahtuvalle kuljetukselle ja 3 päivän välein tapahtuvalle kuljetukselle, jotta saatiin huomioitua kuivajakeen kompostoitumisen vaikutus tuloksiin. Kuormaus- ja purkukustannukseksi on laskettu 47,2 €/h tunti-palkalla 0,472 €/m³, kun kuljetetaan 20 m³ kuivalantaa kerrallaan. Kun kuljetetaan 4 m³ kuivalantaa kerrallaan kuormaus- ja purkukustannus on 1,38 €/m³.

Taulukko 3. Kuivajakeen kuljetuskustannuksen laskennassa käytettyjä arvoja. Muokattu lähteistä Palva (2015) sekä Ahonen ja Koivistoinen (2014).

kuljetettava määrä (m ³)	20	4 Lähde:
Kuljetuskustannus (€/h)	57	57 Palva (2015)
Kuormaustyön kustannus (€/h)	47,2	47,2 Palva (2015)
Ajonopeus (km/h)	20	20
Lastaus siirtovaunu (min)	10	5 Ahonen (2014)
Purku siirtovaunu (min)	2	2 Ahonen (2014)
Kuormauskustannus (€/kuorma)	9,44	5,51
Kuormauskustannus (€/m ³)	0,472	1,38

Separoitavan lietteen ja kuivajakeen massan laskentaan käytettiin separointikokeesta saatuja lietteen ja kuivajakeen tiheyksiä. Lannan ravinteiden referenssiarvo määritettiin tyyppien, fosforin ja kaliumin perusteella teollisesti valmistetun lannoitteen hinnan mukaan. Referenssiarvolla pyrittiin arvioimaan lannan markkina-arvoa. Arvo määritettiin kolmen sopivan lannoitteen perusteella lineaarisia yhtälöitä hyväksi käyttäen (taulukko 4). Käytetyt lannoitteet olivat Yaran valmistamat kaliumsulfaatti (N-P-K: 0-0-41), starttiravinne (12-23-0) ja YaraBela suomensalpietari (27-0-1). Lannoitevalinnan kriteeri oli se, että vähintään yhdessä lannoitteessa sai olla vain yhtä ravinnetta (NPK) (Kässi ym. 2013). Lannan arvon vertaaminen teolliseen lannoitteeseen on kuitenkin hankalaa, sillä lannoitteiden hinnat ovat ilman rahtia ja lannoitteen hinta vaihtelee merkittävästi vuodenajan mukaan. Rahtikustannuksena on käytetty arvoa 0,015 €/kg ja lannoitteiden hinnat ovat ajan kesäkuu 2016 - huhtikuu 2017 keskihintoja (taulukko 4) (Juho Kalliomäki, Berner, sähköpostiviesti kirjoittajalle 5.4.2017; Ilkka Seppä, Hankkija, sähköpostiviesti kirjoittajalle 10.4.2017;). Laskennassa käytettiin ravinneanalyysin (luku 4.3.1) tuloksia. Lähtöarvot on esitetty taulukossa 4. Laskelma kokonaisuudessaan on liitteessä 2.

Taulukko 4. Lannan ravinteiden arvon määrittämiseen käytetyt lähtöarvot ja teolliset lannoitteet ja niiden hinnat. Mädatteen liukoinen ravinne on kolmen otoksen keskiarvo.

Ravinne:	N	P	K	22.6.2016 ALKAEN	2.4.2017 ALKAEN
				Alv 0 % €/tn	Alv 0 % €/tn
Liukoinen ravinne liete (kg/m ³)	1,40	0,69	3,10		
Liukoinen ravinne mädäte (kg/m ³)	1,69	0,69	3,10		
Teolliset lannoitteet:					
Starttiravinne kg/kg lannoitetta	0,12	0,23	0	553	622
Yarabela Suomensalpietari kg/kg lannoitetta	0,27	0	0,01	215	291
Kaliumsulfaatti kg/kg lannoitetta	0	0	0,41	669	738

4.6 Biokaasulaitoksen lisäsyötteiden ja sekoitusmenetelmien vertailu

Kuivajakeen ja säilörehun tuottaman lisäarvon vertailuun otettiin mukaan neljä skenaariota, joissa kaikissa reaktoria sekoitettiin tauotetusti (sykli 10 min sekoitusta / 20 min taukoa). Vertailtavat lisäsyötteet olivat YSAO (Ylä-Savon ammattiopisto):n kuivajae (koeviikot 15 ja 18), Luken kuivajae (BMP:t esitetty luvussa 5.2) sekä säilörehu täyden tuotantokustannuksen kanssa ja hävikkisäilörehuna (luku 4.3.9).

Kun käytettiin kuivajakea lisäsyötteenä muuttujana toimi kuivajakeen varastointiaika (7–14 vrk ja 1–3 vrk). Kuivajakeen varastointiajalla tutkittiin kompostoitumisen vaikutusta BMP:hen ja siitä aiheutuvaa kuivajakeen kuljetuksen kannattavuuden vaihtelua. Säilörehun tuottaman lisähyödyn laskentaan otettiin arvot Valuegrass-hankkeen tutkimuksesta vuosilta 2014–2015 (Ville Pyykkönen, Luke, sähköpostiviesti kirjoittajalle 16.2.2018). Laskelmissa huomioitiin myös tämän tutkimuksen aikana toteutuneet metaanintuottopotentiaalin toteumat, lisäsyötteen osuus reaktorin sekoitusenergiasta ja ulkolämpötilan vaihtelu.

Ulkolämpötilan vaihtelu suhteutettiin koko vuoden ulkolämpötilan keskiarvoon, joka oli vuonna 2012 Maaningalla +4 °C (Pyykkönen ja Luostarinen 2013). Reaktorin syötteen lämmittämiseen tarvittava lämpöenergia laskettiin kaavalla 6, johon tarvittava ominaislämpökapasiteetti saatiin kaavalla 7.

$$E_{\text{syöte}} = C * m * \Delta T \quad (6)$$

jossa

C = syötteen ominaislämpökapasiteetti (kWh/t°C)

m = syötteen massavirta (t/vrk)

ΔT = Reaktorin lämpötilan (37 °C) ja syötteen lämpötilaero

$$C = \frac{(4,19 - 0,0275 * TS \%)}{3,6} \quad (7)$$

jossa

TS % = Syötteen kuiva-ainepitoisuus (%)

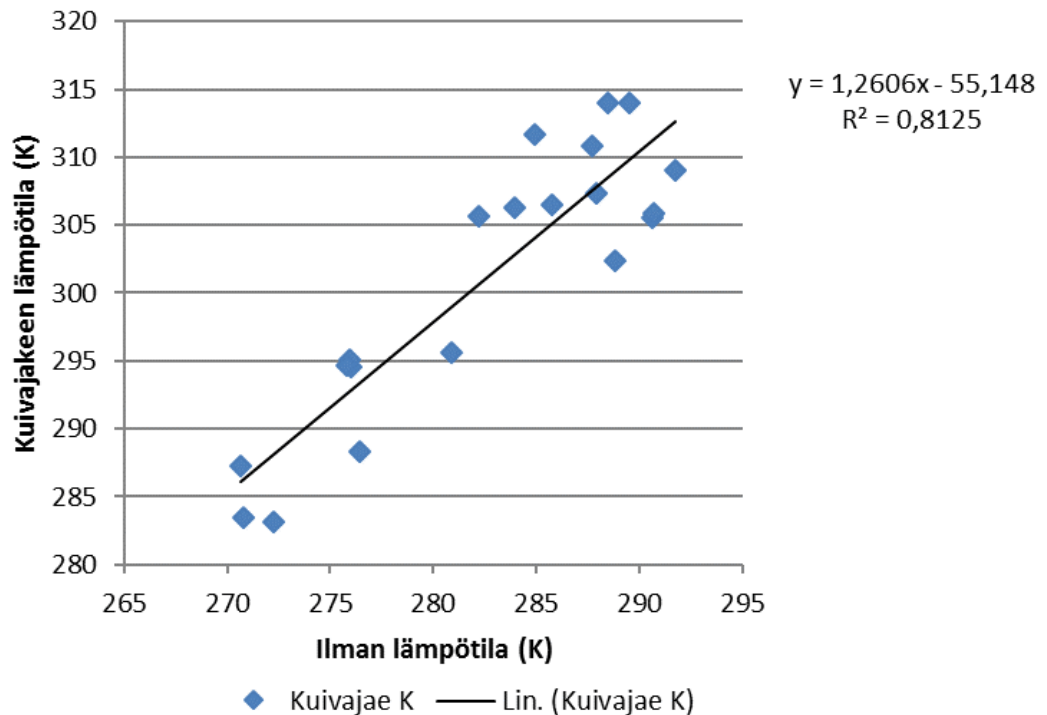
Säilörehusyötteen lämpötilaksi oletettiin 4 °C ulkolämpötilaa korkeampi lämpötila. Kuivajakeen lämpötila laskettiin ilman lämpötilojen perusteella regressiomallilla (kaava 8, kuva 8). Ilman lämpötilan päivä- ja viikkokeskiarvot laskettiin Ilmatieteen laitoksen avoimesta datasta (Ilmatieteenlaitos 2018). Lisäsyötteiden lämmityksessä on huomioitu vain energia, joka vaaditaan lisäsyötteen lämmitykseen reaktorin lämpötilaan (37 °C eli 310 K). Lisäsyöte ei lisää lämpöhäviöitä ympäristöön, sillä reaktori pidettäisiin joka tapauksessa tässä lämpötilassa. Myöskään reaktorin sekoitusteho ja sekoitus sykli eivät riipu lisäsyötteestä, sillä lisäsyöte ei mainittavasti nosta sähkön kulutusta. Kuitenkin sekoituksen riittämättömyys vaikuttaa BMP-toteumaan, joka oli kuivajakeella huonompi kuin säilörehulla. Tästä syystä sähkön kulutusta ei huomioitu lisäsyötteiden kannattavuusvertailuissa (Ville Pyykkönen, Luke, sähköpostiviesti kirjoittajalle 16.2.2018).

$$y = 1,2606 * x - 55,148 \quad (8)$$

jossa

y = kuivajakeen lämpötila (K)

x = ilman lämpötila (K)



Kuva 8. Ilman ja kuivajakeen lämpötilojen sirontakaavio ja regressiomalli kuivajakeen lämpötilan määrittämiseksi (Ville Pyykkönen, Luke, sähköpostiviesti kirjoittajalle 16.2.2018).

4.7 Kuivajakeen kuljetuksen kannattavuus

Kuivajakeen käytön kannattavuudelle laskettiin euromääräinen päiväkohtainen hyöty. Kuivajakeen kuljetuksen kannattavuus laskettiin vertaamalla tuotetun energian ja ravintehyödyn määrää toteutuneisiin kustannuksiin. Tuotettu energia jaettiin sähköksi ja lämmöksi CHP-yksikön hyötysuhteen perusteella (Sähköä 26 %, lämpöä 61,5 %). Sähkön hintana käytettiin 10 snt/kWh, hakkeen hintana käytettiin 2,48 snt/kWh ja öljyn hintana käytettiin 8,73 snt/kWh. Oletettiin, että kaikki lisäsyötteillä tuotettu energia saatiin käyttöön.

Energian arvo laskettiin korvattaessa sekä haketta että kevytpolttoöljyä, laskelmissa huomioitiin pelkästään polttoaineen hinta, mutta ei muita lämmöntuottolaitoksen kustannuksia. Kuivajakeen käytön kustannuksissa otettiin huomioon kuivajakeen kuljetus-, lastaus- ja separointikustannus. Tuloksia verrattiin säilörehun ja hävikkisäilörehun tuottamiin päiväkohtaisiin energiahyötyihin (liite 1).

5 TULOKSET

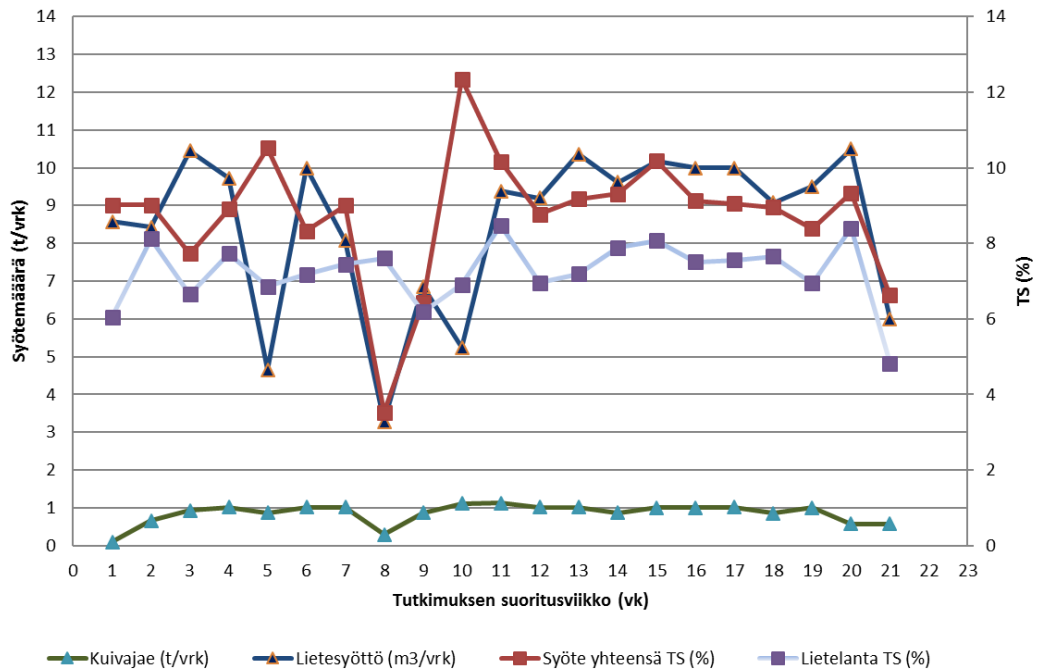
5.1 Koejaksot

Tutkimuksen mittaukset aloitettiin 7.3.2016, josta alkoi tutkimuksen viikko 1. Prosessiin syötettävän kuivajakeen määrää ei pystytty vakiinnuttamaan halutulle syötetasolle (1500 kg kuivajakea/vrk), vaan todettiin, että käyttökelpoinen kuivajakeen syötemäärä Maanin-gan biokaasulaitoksessa oli 1000 kg kuivajakea/vrk eli noin 9 % kokonaisyötteestä. Pro- sessin vakiintuminen halutulle tasolle kesti teknisten ongelmien vuoksi liki kolme kuu- kautta, joten tutkimuksen sekoitusvaiheet suoritettiin tutkimusviikoilla 11–20 (kuva 9). Tutkimuksen kolme vaihetta olivat seuraavat: vaihe yksi eli jatkuva sekoitus (luku 5.6.1) suoritettiin tutkimuksen alusta laskettuna viikoilla 11–14, vaihe kaksi eli tauotettu sekoi- tus (luku 5.6.2) tutkimuksen viikoilla 15–18 ja vaihe kolme eli kaasusekoitus (luku 5.6.3) tutkimuksen viikoilla 19–20.

Kuivajakea pystyttiin syöttämään biokaasuprosessiin noin 1000 kg/vrk (kuva 9). Tällöin orgaaninen kuormitus (luku 5.3) oli tutkimusviikkojen 11–20 aikana keskimäärin 3,08 kgVS/m³vrk. Kuivajakea syötettiin reaktoriin kerran päivässä. Lietettä pumpattiin reak- toriin keskimäärin kolme kertaa päivässä, yhteensä noin 10 m³/vrk. Lietteen tilavuuspai- noksi oletettiin 1000 kg/m³.

Tutkimuksessa ei saatu tehtyä niin pitkiä tutkimusjaksoja (vähintään 4 viikkoa jokainen vaihe) kuin olisi haluttu. Toisaalta prosessi ehti sopeutua syötetasoihin useamman kuu- kauden ajan ennen kuin tutkimuksen vaiheet eli reaktorin jatkuva sekoitus (vaihe 1), tau- otettu sekoitus (vaihe 2) ja kaasusekoitus (vaihe 3) suoritettiin. Tulokset on esitetty viik- kokohtaisesti aritmeettisinä keskiarvoina, sillä mittaustulokset vaihtelivat päivittäin melko paljon.

Tutkimuksen aikana lietelantasyötteen kuiva-ainepitoisuuden viikkokohtainen keskiarvo vaihteli välillä 7,0–8,4 %. Syötetyn kuivajakeen ja lietelannan kokonaiskuiva-ainepitoi- suus vaihteli 8,5:n ja 10,2:n % välillä. Vaihtelut olivat melko pieniä, joten reaktorin mik- robikanta ehti sopeutua olosuhteisiin hyvin.



Kuva 9. Tutkimuksen aikana toteutuneet lietelannan ja kuivajakeen syötemäärät (t/vrk) sekä lietteen ja kokonaissyötteen kuiva-ainepitoisuus (TS %). Syötteet on ilmoitettu tuhansina kiloina päivässä ja kuiva-aine prosentteina kokonaismassasta. Tutkimuksen ensimmäinen vaihe tehtiin tutkimuksen viikoilla 11–14 (jatkuva sekoitus), toinen vaihe tutkimuksen viikoilla 15–18 (tautettu sekoitus) ja kolmas vaihe viikoilla 19–20 (kaasusekoitus).

5.2 Syötteiden metaanintuottopotentialit (BMP:t)

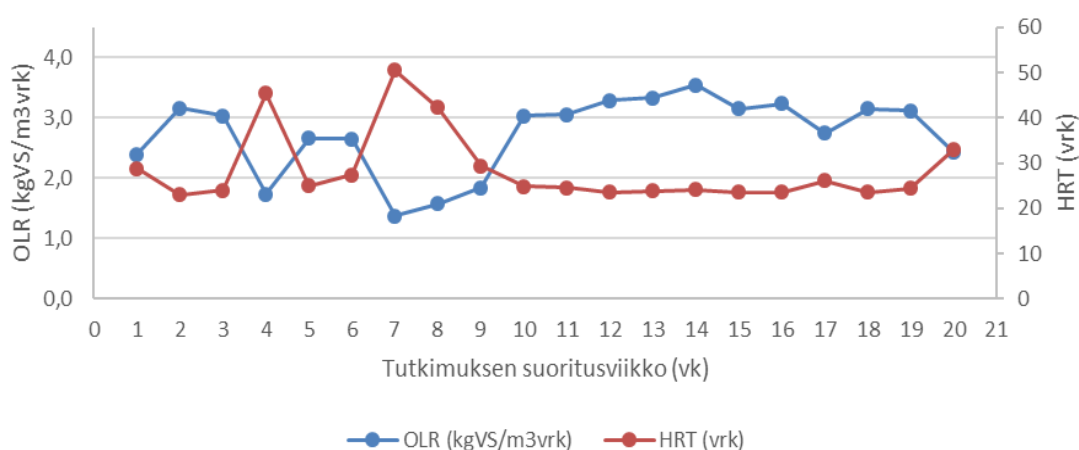
Tämän tutkimuksen aikana käytettiin viikoilla 11, 12, 15 ja 18 lietelantaa, jonka BMP oli $221 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$ ja viikoilla 16, 17, 19 ja 20 lietelantaa, jonka BMP oli $230 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$ (taulukko 5). Kuivajakeen metaanintuottopotentiali oli $101\text{--}178 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$. Viikoilla 11–15 ja viikolla 18 käytettiin Ylä-Savon ammattiopistolla (YSAO) separoitua kuivajae, jolloin kuivajae ehti kompostoitua ennen biokaasulaitokseen syöttöä 1–2 viikkoa. Tällöin BMP oli $101\text{--}122 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$. Viikoilla 16, 17, 19 ja 20 kuivajae separoitiin Luke Maaningalla, jolloin se ehti kompostoitua 1–3 vrk ennen syöttöä reaktoriin. Tällöin BMP oli $178 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$. Kuivajakeen orgaaniseen aineeseen BMP ($101\text{--}178 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{vrk}$) oli pienempi kuin lietelannan orgaanisen aineen BMP ($221\text{--}230 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{vrk}$), mutta tuorepainoon nähden BMP oli kuivajakeella moninkertainen (taulukko 1).

Taulukko 5. Syötteiden biokemialliset metaanintuottopotentialit (BMP:t) 39 vrk:n pituisessa panoskokeessa. Nurmisäilörehun BMP määritettiin 48 vrk panoskokeessa Valuegrass-hankkeessa (Pyykkönen ja Luostarinen 2018).

Koontinäyte koeviikoilta	ka (%)	VS (%)	BMP (Nm ³ /tTP)	BMP (Nm ³ CH ₄ /tVS)	BMP:n keskihajonta (%)	Otoskoko
11, 12, 15 ja 18	8,2	6,7	14,8	221	1,9	n = 3
16, 17, 19 ja 20	7,7	6,2	14,3	230	5,3	n = 3
1-4 ja 6	19,8	18,1	21,4	119	4,8	n = 3
11	25,4	22,9	23,2	101	3,2	n = 2
16, 17 ja 19	24,3	21,7	38,5	178	5,1	n = 3
15 ja 18	24,2	21,8	26,5	122	2,5	n = 3
-	25,2	23,0	75,0	326		n = 3

5.3 Tutkimuksen aikana toteutuneet kuormitukset ja viipymäajat

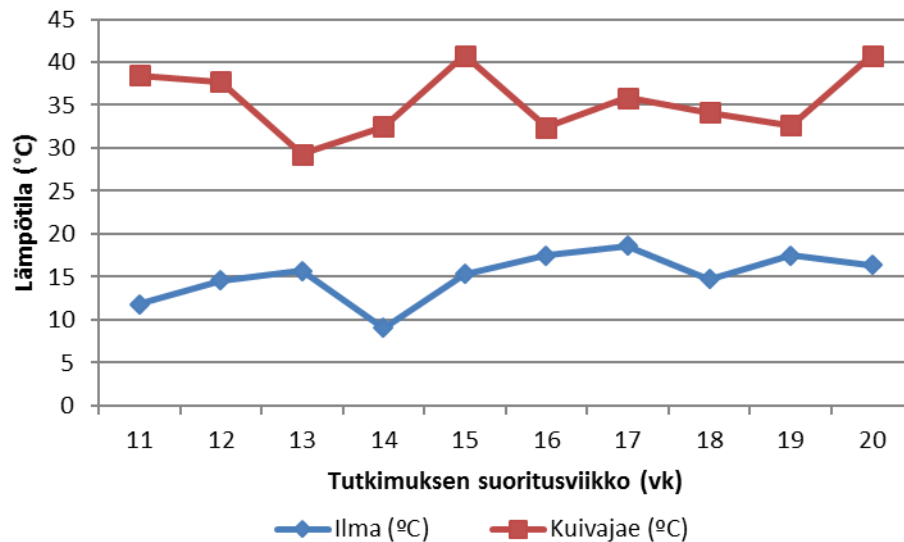
Syötemäärien ja orgaanisen aineen perusteella laskettiin kuormitus ja viipymäajat viikkokeskiarvoina (kuva 10). Tavoiteltaviin kuormitukseen (OLR 3–3,5 kgVS/m³vrk) ja viipymiin (HRT noin 25 vrk) päästiin kunnolla vasta tutkimuksen puolivälissä (viikolla 11). Viikoilla 4 ja 10 kaasun käyttölaiteistoissa oli vikaa, minkä vuoksi kaasua ei voitu käyttää, eikä reaktoriin syötetty syötettä. Lisäksi kaasunvirtaaman mittaus ei toiminut kunnolla. Tästä syystä hydraulinen viipymäaika kasvoi laskennallisesti 50 päivään. Tutkimuksen viikoilla 11–20 kaasun virtaaman mittalaitteet toimivat ja hydraulinen viipymäaika sekä orgaaninen kuormitus saatiin pysymään likimain halutuilla tasoilla, jolloin saatiin myös vertailukelpoisia tuloksia. Tutkimuksen eri vaiheet (vaihe 1: jatkuva sekoitus (luku 5.6.1), vaihe 2: tauotettu sekoitus (luku 5.6.2) ja vaihe 3: kaasusekoitus (luku 5.6.3) suoritettiin näiden viikkojen aikana. Viikoilla 11–20 HRT oli keskimäärin 25,1 vrk ja orgaaninen kuormitus keskimäärin 3,11 kgVS/m³vrk.



Kuva 10. Viikoittain toteutuneet viipymäajat punaisella (HRT) ja reaktorin orgaaniset kuormitukset sinisellä (OLR). Viikoilla 4–10 laitteistossa oli toimintahäiriöitä, minkä vuoksi tulokset laskettiin viikosta 11 eteenpäin.

5.4 Tutkimuksen aikana toteutuneet kuivajakeen lämpötilat

Ilman lämpötilan päivä- ja viikkokeskiarvot (kuva 11) laskettiin Ilmatieteen laitoksen avoimesta datasta (Ilmatieteenlaitos 2018). Kuivajakeen toteutuneeksi lämpötilaksi saatiin keskimäärin 35 °C, joten kuivajakea ei juurikaan tarvinnut lämmittää kuivajakeen ollessa reaktorin lisäsyötteenä.

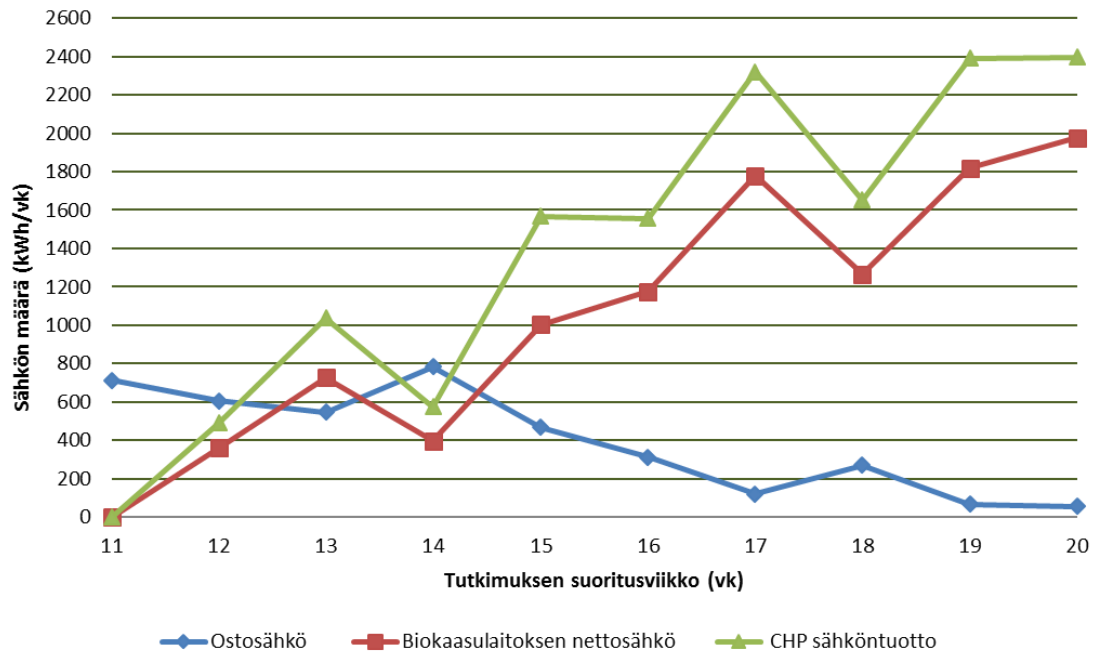


Kuva 11. Kokeen aikana toteutuneet lämpötilat ja niiden perusteella lasketut kuivajakeen lämpötilat.

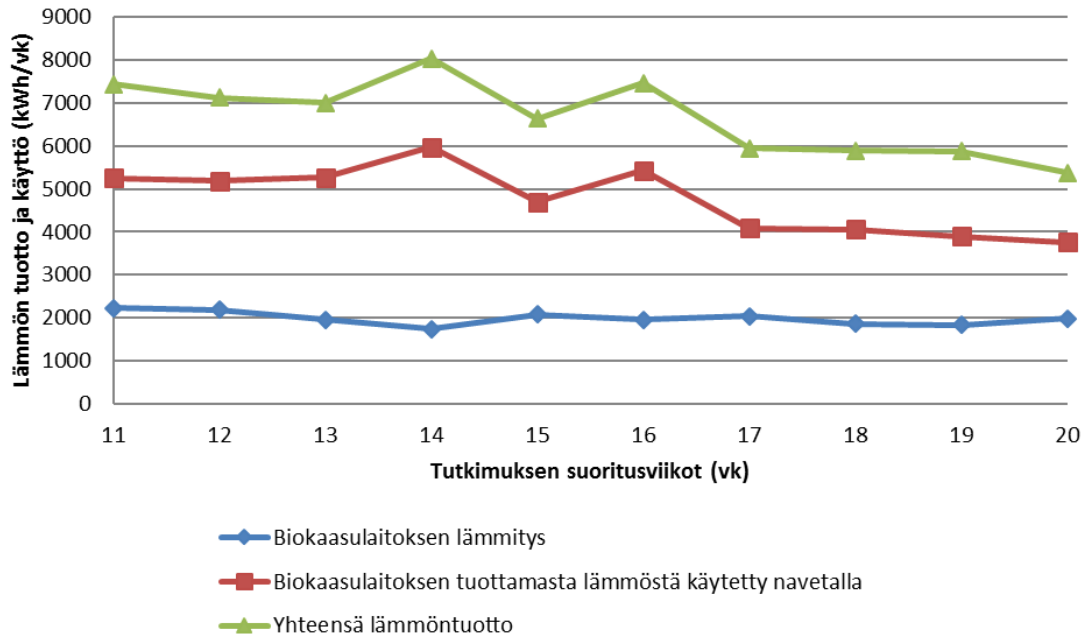
5.5 Toteutuneet energian tuotot ja kulutukset

Tästä eteenpäin tarkastellaan tutkimusta viikosta 11 eteenpäin, sillä kuten kuvasta 9 nähdään, ennen sitä ei saatu vertailukelpoisia tuloksia. Tutkimuksen aikana toteutuneet energiantuotot ja -kulutukset vaihtelivat melko paljon (kuva 12). Viikosta 11 eteenpäin sähköntuotantoa pystyttiin nostamaan jatkuvasti. Sähköntuotanto oli parhaimmillaan viikolla 20, jolloin nettosähkön määrä oli keskimäärin 340 kWh vuorokaudessa (biokaasulaitoksen tuotto – biokaasulaitoksen omakulutus). Tällöin pystyttiin korvaamaan ostosähkö lähes kokonaan. Toisaalta tutkimuksen viimeisten viikkojen (kaasusekoituksen) aikana sähköntuoton ollessa suurimmillaan lämmöntuotanto oli noin 100 kWh pienempi ja kokonaisenergiantuotto oli hiukan pienempi kuin tutkimuksen vaiheessa kaksi (tautettu sekoitus). Viikoilla 12–17 lämmöntuotto oli noin 1000 kWh/vrk (kuva 13). Lämmön omakulutus pieneni hiukan tutkimuksen aikana ulkolämpötilan nousun takia. Sähkön omaku-

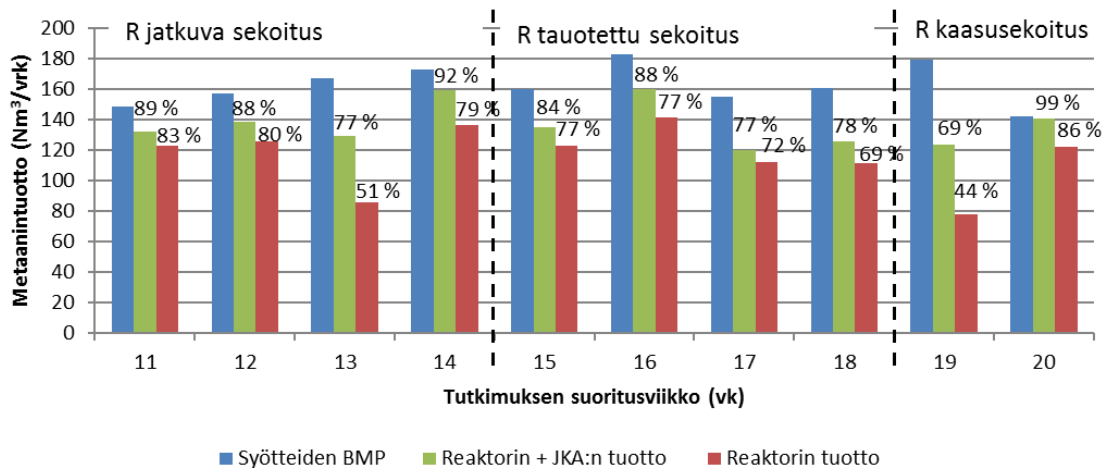
lutus laski selvästi, kun siirryttiin tauotettuun sekoitukseen viikolla 15. Tutkimuksen aikana saavutettiin viikkokeskiarvona keskimäärin 84 % metaanintuottopotentialista. Parhaimmillaan BMP:sta viikkokohtaisena keskiarvona saavutettiin noin 99 % syötteen metaanintuottopotentialista viikolla 20, tämän aiheutti viikon 19 huono BMP-toteuma. (kuva 14).



Kuva 12. Tutkimuksen aikana toteutuneet sähköntuotot ja -kulutukset viikkokeskiarvoina tutkimuksen viikoilla 11–20. Nettosähkö on biokaasulaitoksen tuottama sähkö – biokaasulaitoksen kuluttama sähkö.



Kuva 13. Tutkimuksen aikana toteutuneet lämmöntuotot ja -kulutukset viikkokohtaisina keskiarvoina tutkimuksen viikoilla 11–20.



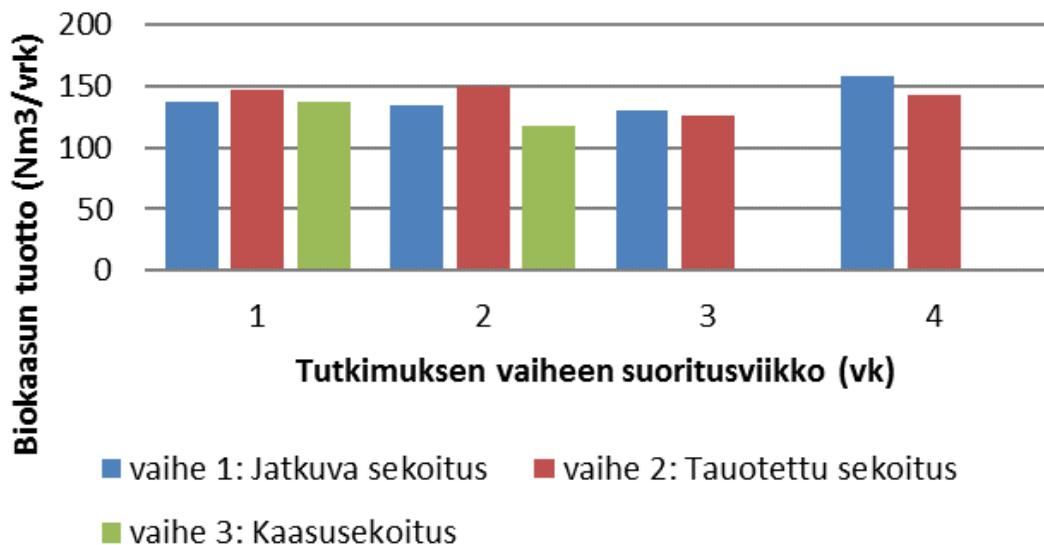
Kuva 14. Tutkimuksen aikana toteutuneet reaktorin (R) ja koko laitoksen (reaktori + JKA) metaanintuotot ja syötteen metaanintuottopotentiaalit (BMP) koeviikoilla 11–20. Reaktorin ja koko biokaasulaitoksen metaanintuoton BMP-toteumat (%) on merkitty vihreiden ja punaisten metaanintuottopalkkien päälle.

5.6 Reaktorin sekoitustavan vaikutus metaanintuottoon ja energiataseeseen

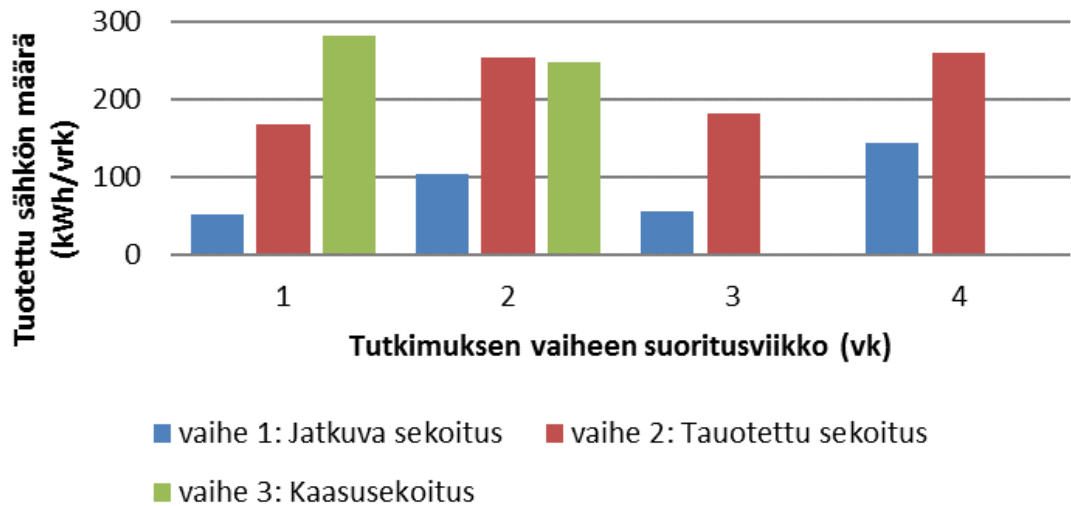
Tutkimuksessa saatiin neljän viikon, neljän viikon ja 11 vrk:n pituiset tulokset tutkimuksen kolmesta vaiheesta. Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa (jatkuva sekoitus neljä viikkoa, viikot 11–14) reaktoria sekoitettiin jatkuvasti kahdella upposekoittimella. Tutkimuksen toisessa vaiheessa (tauotettu sekoitus kolme viikkoa, viikot 15–18) reaktoria sekoitettiin kymmenen minuuttia kerrallaan 20 minuutin välein samoilla upposekoittimella kuin tutkimuksen vaiheessa 1. Tutkimuksen kolmannessa vaiheessa (tutkimusviikot

19–20) käytettiin kaasusekoitusta, eli biokaasu johdettiin lamellikompressorille, joka syötti kaasun paineella takaisin reaktorilietteeseen reaktorin pohjalle asennettujen suuttimien kautta. Tutkimuksen kolmas vaihe kesti vain 11 päivää, sillä polttolaitteisiin tuli vika viikon 20 lopussa, eikä tutkimusta voitu jatkaa. Maaninnan biokaasulaitoksessa ei ole soihutpoltinta.

Tutkimuksen aikana tuotetut metaanin määrät vaihtelivat vain vähän (kuva 15). Viikko-kohtainen kaasuntuotto oli suurin jatkuvan sekoituksen viikolla 4 (tutkimuksen viikko 14), noin $158 \text{ Nm}^3/\text{vrk}$. Keskimääräinen kaasuntuotto tutkimuksen eri vaiheissa oli $138 \text{ Nm}^3/\text{vrk}$, joten erot eivät ole merkittäviä. Tulos kertoo, että sekoitustavalla ei ollut merkitystä kaasuntuottoon. Tuotettu nettosähkön määrä oli tauotetun sekoituksen ja kaasusekoituksen aikana huomattavasti korkeampi lähinnä enemmän käytetyn CHP-yksikön vuoksi (kuva 16). Tutkimuksen ensimmäisen vaiheen aikana nettosähkön keskiarvo oli $89 \text{ kWh}/\text{vrk}$, tutkimuksen toisen vaiheen aikana $201 \text{ kWh}/\text{vrk}$ ja kolmannen vaiheen aikana $271 \text{ kWh}/\text{vrk}$. Toisaalta tällöin lämmöntuotto oli hiukan alhaisempi (kuva 13).



Kuva 15. Sekoitusvaiheiden aikana tuotettu kaasumäärä (Nm^3/vrk) viikkokohtaisena keskiarvona. Vaihe 1 oli jatkuva sekoitus (sininen, 4 vk). Vaihe 2 oli tauotettu sekoitus (punainen, 4 vk) ja vaihe 3 oli kaasusekoitus (vihreä, 2 vk).



Kuva 16. Sekoitusvaiheiden aikana tuotettu nettosähkö tutkimuksen eri vaiheissa viikko-kohtaisena keskiarvona. Vaihe 1 oli jatkuva sekoitus (sininen, 4 vk) upposekoittimella. Vaihe 2 oli tauotettu sekoitus upposekoittimella (punainen, 4 vk). Vaihe 3 oli kaasusekoitus (vihreä, 2 vk).

5.6.1 Jatkuva sekoitus upposekoittimilla

Jatkuvan sekoituksen vaihe suoritettiin tutkimuksen viikoilla 11–14, ja se kesti 28 päivää. Taulukossa 6 on esitetty tutkimuksen vaiheen 1 keskeisten tunnuslukujen keskiarvot, keskihajonnat ja keskivirheet. Tunnuslukujen minimi- ja maksimiarvot vaihtelivat paljon tutkimuksen aikana. Toisaalta keskihajonta ja keskivirhe osoittavat, että suuret vaihtelut olivat vain yksittäisten päivien vaihtelua.

Jatkuvan sekoituksen aikana sähkön omakulutus oli 128 kWh/vrk ja lämmön omakulutus oli noin 280 kWh/vrk (taulukko 6). Kaasun energiaan suhteutettu sähkön omakulutus oli 9,2 %, lämmön omakulutus 20,3 % ja nettoenergia oli 56 %. Energiantuoton melko suuret vaihtelut johtuivat yksittäisten päivien suurista vaihtelusta, keskihajonta oli 276 kWh/vrk ja keskivirhe oli 47 kWh/vrk. Nämä vaihtelut johtuivat käytön tarpeen vaihtelusta. Energiankulutuksen keskihajonta oli 49,7 kWh/vrk. Jatkuvan sekoituksen aikana toteutunut energiatase oli 3,4. Syötteiden metaanintuottopotentiaalista toteutui 86,6 %.

Taulukko 6. Jatkuvan sekoituksen syötemäärät, metaanintuottopotentialiaali, energiantuotot ja –kulutukset, energiataseet sekä niiden keskiarvot, minimi, maksimit, keskihajonnat ja keskihajonnan keskivirheet. Otokoko n = 28.

koeviikot	11-14 päivät 17.5-13.6				
syötteet	keskiarvo	min	max	keskihajonta	keskivirhe
Lietelantaa (t/vrk)	9,8	3,7	15,6	2,0	0,4
Lietelannan TS (%)	7,7	5,5	8,9	1,2	0,2
Lietelannan VS (%)	6,3	4,5	7,3	1,0	0,2
Kuivajaetta (t/vrk)	1,0	0,0	1,1	0,2	0,0
Kuivajakeen TS (%)	26,9	23,0	30,6	2,4	0,5
Kuivajakeen VS (%)	24,3	20,7	27,6	2,3	0,4
Syötettä yhteensä (t/vrk)	10,8	4,7	16,6	2,0	0,4
Syötteen TS (%)	9,5	7,0	12,9	1,3	0,2
BMP (kWh/vrk)	1612,6				
Kaasun energiasäiltö (kWh/vrk)	1396,9	618,7	2108,0	344,2	59,0
BMP-toteuma (%)	86,6				
Energian tuotot ja kulutukset					
CHP sähköntuotto (kWh/vrk)	131,0	0,0	400,3	161,0	27,6
Lämmöntuotto (kWh/vrk)	1057,6	619,9	1452,3	163,6	28,1
Energian tuotto yht. (kWh/vrk)	1188,7	619,9	1852,6	276,3	47,4
Sähkön omakulutus (kWh/vrk)	128,1	79,9	191,0	24,9	4,3
Lämmön omakulutus (kWh/vrk)	283,4	62,0	365,1	57,0	9,8
Energian kulutus yhteensä (kWh/vrk)	411,4	253,0	516,1	49,7	8,5
Nettosähkö (kWh/vrk)	88,7	0,0	278,2	107,9	18,5
Nettolämpö (kWh/vrk)	774,3	467,6	1168,6	162,2	27,8
Nettoenergia yhteensä (kWh/vrk)	863,0	467,6	1424,0	226,9	38,9
Energiataseet					
Sähkön oma kulutus / kaasun energia (%)	9,2				
Lämmön omakulutus / kaasun energia (%)	20,3				
Omakulutus yht. / kaasun energia (%)	29,5				
Nettoenergia / kaasun energia (%)	55,6				
Energiatase	3,4				

5.6.2 Tauotettu sekoitus upposekoittimilla

Tauotettu sekoitus suoritettiin viikoilla 15–18 (taulukko 7). Syötteiden tuoremassat olivat tauotetun sekoituksen ja jatkuvan sekoituksen aikana samat. Kuitenkin etenkin kuivajakeen kuiva-ainepitoisuus oli yli 10 % pienempi kuin jatkuvan sekoituksen aikana. Tämän takia kokonaiskuiva-ainepitoisuus laski noin 5 %. (taulukko 6 ja taulukko 7) ja orgaaninen kuormitus laski 6 % verrattuna jatkuvaan sekoitukseen (kuva 9).

Kuormituksen laskusta huolimatta kokonaissyötteen metaanintuottopotentialiaali kasvoi jatkuvaan sekoitukseen verrattuna noin 20 kWh/vrk (2 %). Tästä huolimatta tuotetun kaasun energiasäiltö oli tauotetun sekoituksen aikana pienempi kuin jatkuvan sekoituksen aikana ja metaaninpotentialista toteutui 82,1 %. Tauotetun sekoituksen aikana sähkön omakulutus laski 33 kWh/vrk, mikä on 26 % vähemmän kuin jatkuvan sekoituksen aikana. Myös lämmön omakäyttö pieneni vastoin odotuksia noin 10 kWh/vrk (4 %). Tämä

tosin johtuu syötteiden, maan ja ilman lämpötilavaihteluista. Kaikki energiataseet olivat vähintään samaa tasoa kuin jatkuvan sekoituksen vaiheessa. Kokonaisenergian tase nousi 10 %, mutta nousu johtui osittain ulkoilman lämpenemisestä.

Taulukko 7. Tauotetun sekoituksen syötemäärät, metaanintuottopotentiaali, energiantuotot ja –kulutukset, energiataseet sekä niiden keskiarvot, minimi, maksimit, keskihajonnat ja keskivirheet. Otokoko N = 28.

Koeviikot 16-18.	päivät -14.6-4.7					
syötteet	keskiarvo	Min	Max	keskihajonta	keskivirhe	
Lietelantaa (t/vrk)	9,6	3,5	10,0	1,4	0,3	
Litelannan TS (%)	7,4	6,1	8,5	0,5	0,1	
Lietelannan VS (%)	6,3	5,8	7,0	0,3	0,1	
Kuivajaetta (t/vrk)	1,0	0,0	1,1	0,2	0,0	
Kuivajakeen TS (%)	23,9	21,2	26,5	1,6	0,3	
Kuivajakeen VS (%)	21,4	19,1	23,7	1,4	0,3	
Syötettä yhteensä (t/vrk)	10,6	3,5	11,1	1,5	0,3	
Syöteen TS (%)	8,9	7,5	10,1	0,5	0,1	
BMP (kWh/vrk)	1633,1					
Kaasun energiasisältö (kWh/vrk)	1350,0	373,3	1809,7	324,4	70,8	
BMP-toteuma (%)	82,7					
Energian tuotot ja kulutukset						
CHP sähköntuotto (kWh/vrk)	282,8	0,0	401,0	143,4	31,3	
Lämmöntuotto (kWh/vrk)	926,3	341,9	1198,6	161,4	35,2	
Energian tuotto yht. (kWh/vrk)	1209,1	407,4	1536,8	245,7	53,6	
Sähkön omakulutus (kWh/vrk)	94,7	85,5	103,8	5,2	1,1	
Lämmön omakulutus (kWh/vrk)	273,8	229,2	304,5	19,8	4,3	
Energian kulutus yhteensä (kWh/vrk)	368,5	316,5	400,1	21,9	4,8	
Nettosähkö (kWh/vrk)	215,6	0,0	309,7	109,3	23,8	
Nettolämpö (kWh/vrk)	652,5	109,0	907,3	148,7	32,5	
Nettoenergia yhteensä (kWh/vrk)	868,1	158,1	1165,9	209,1	45,6	
Energiataseet						
Sähkön oma kulutus / kaasun energia (%)	7,0					
Lämmön omakulutus / kaasun energia (%)	20,3					
Omakulutus yht. / kaasun energia (%)	27,3					
Nettoenergia / kaasun energia (%)	62,3					
Energiatase	3,7					

5.6.3 Kaasusekoitus

Kaasusekoituskoe tehtiin viikoilla 19–20 (taulukko 8). Kaasusekoituksen aikana syötetyn kuivajakeen määrä väheni. Pienemmän syötemäärän takia myös reaktorin orgaaninen kuormitus laski jatkuvaan ja tauotettuun sekoitukseen verrattuna (kuva 9). Kuitenkin syötteen keskimääräinen kuiva-ainepitoisuus nousi verrattuna jatkuvaan sekoitukseen. Syötteen toteutunut metaanintuottopotentiaali oli suurempi kuin jatkuvan sekoituksen aikana, tästä huolimatta tuotetun kaasun energiasisältö pieneni 7 % jatkuvaan sekoitukseen verrattuna (taulukko 6 ja taulukko 8). Metaanintuottopotentiaalista toteutui 84 %.

Sähkön omakulutus oli 42 % pienempi verrattuna jatkuvaan sekoitukseen. Energian omakulutus suhteessa kaasun energiaan oli 11 % parempi kuin jatkuvan sekoituksen aikana. Nettoenergian määrä oli 68 % kaasun energiasta.

Taulukko 8. Kaasusekoitusvaiheen syötemäärät, metaanintuottopotentiaali, energiantuotot ja –kulutukset, energiataseet sekä niiden keskiarvot, minimi, maksimit, keskihajonnat ja keskivirheet. Otokoko N = 11.

Koeviikot 19-20	päivät 5.7-18.7				
syötteet	keskiarvo	min	max	keskihajonta	keskivirhe
Lietelantaa (t/vrk)	9,3	2,0	13,5	2,8	0,9
Lietelannan TS (%)	8,4	7,7	9,1	0,5	0,1
Lietelannan VS (%)	6,3	6,3	6,3	0,0	0,0
Kuivajaetta (t/vrk)	0,6	0,0	1,0	0,4	0,1
Kuivajakeen TS (%)	26,7	25,7	27,3	0,5	0,1
Kuivajakeen VS (%)	24,0	23,0	24,5	0,4	0,1
Syötettä yhteensä (t/vrk)	10,0	3,0	14,5	2,9	0,9
Syötteen TS (%)	9,9	7,8	14,5	1,8	0,5
BMP (kWh/vrk)	1622,0				
Kaasun energiasisältö (kWh/vrk)	1297,1	838,3	1469,1	198,7	43,4
BMP-toteuma (%)	80,0				
Energian tuotot ja kulutukset					
CHP sähköntuotto (kWh/vrk)	354,1	266,7	388,8	45,2	12,1
Lämmöntuotto (kWh/vrk)	860,7	697,4	925,8	84,2	22,5
Energian tuotto yht. (kWh/vrk)	1214,8	964,2	1312,0	129,2	34,5
Sähkön omakulutus (kWh/vrk)	69,1	62,2	79,2	5,4	1,5
Lämmön omakulutus (kWh/vrk)	264,4	180,5	327,8	45,3	12,1
Energian kulutus yhteensä (kWh/vrk)	333,5	244,1	397,5	46,3	12,4
Nettosähkö (kWh/vrk)	290,1	217,6	324,0	38,8	10,4
Nettolämpö (kWh/vrk)	596,3	416,4	694,9	86,1	23,0
Nettoenergia yhteensä (kWh/vrk)	886,4	634,1	992,0	120,1	32,1
Energiataseet					
Sähkön oma kulutus / kaasun energia (%)	5,3				
Lämmön omakulutus / kaasun energia (%)	20,4				
Omakulutus yht. / kaasun energia (%)	25,7				
Nettoenergia / kaasun energia (%)	67,9				
Energiatase	3,9				

5.7 Eri sekoitusmenetelmien metaanintuottojen vertailu

Jatkuvan sekoituksen aikana syötteiden metaanintuottopotentiaali oli 1612 kWh/vrk. Tauotetun sekoituksen aikana metaanintuottopotentiaali oli 2 % parempi kuin jatkuvan sekoituksen aikana (taulukko 9). Tästä huolimatta tuotetun kaasun energiasisältö oli jatkuvan sekoituksen aikana (1397 kWh/vrk) tämän tutkimuksen paras. Myös metaanintuottopotentiaali toteuma oli jatkuvan sekoituksen aikana paras. Tutkimuksen vaiheiden aikana tuotettua kaasua käytettiin tarpeen mukaan eri polttolaitteilla ja tästä johtuen kaasusekoituksen aikana tuotettiin eniten lämpö- ja sähköenergiaa. Kaasusekoituksen aikana tuotetun energian hyötysuhde oli 93,7 %, kun se oli jatkuvan sekoituksen aikana 85 %.

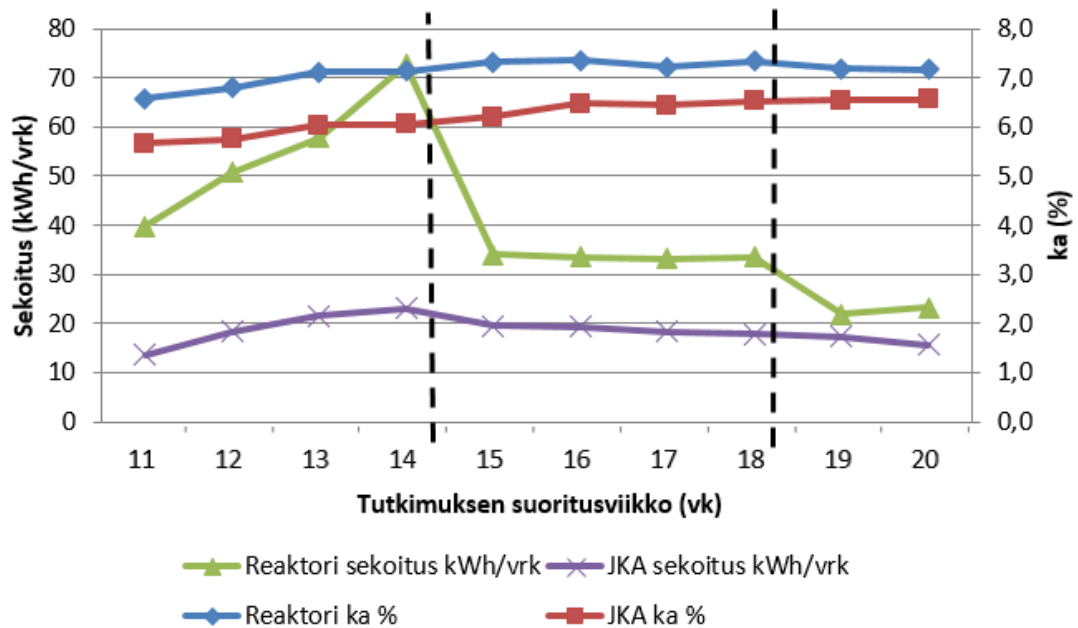
Reaktorin sekoittamiseen tarvittu sähköenergia pieneni tauotetun sekoituksen aikana 40 % jatkuvaan sekoitukseen verrattuna. Kaasusekoituksen aikana reaktorin sekoittamiseen kulutettu sähköenergia oli 60 % pienempi kuin jatkuvan sekoituksen aikana. Tuotetun energian tase oli tauotetun sekoituksen ja kaasusekoituksen aikana yli 5 % parempi,

vaikka huomioitaisiin ulkolämpötilan aiheuttama reaktorin lämmitysenergian pieneneminen.

Jatkuvan sekoituksen aikana reaktorin sekoitustehoa jouduttiin nostamaan nousseen kuiva-ainepitoisuuden takia (40kWh:sta 73 kWh:n), jotta reaktorin lietemassa pysyi liikkeessä (kuva 17). Tauotetun sekoituksen aikana reaktorin BMP-toteuma vastasi jatkuvan sekoituksen ajan toteumaa (kuva 14), mutta jälkikaasuallas tuotti tauotetun sekoituksen aikana vähemmän. Tämä voi johtua tauotetun sekoituksen aikana jälkikaasualtaan yhä kohonneesta kuiva-ainepitoisuudesta (Jatkuvan ja tauotetun sekoituksen aikana jälkikaasualtaan sekoitusteho oli keskimäärin sama) (kuva 17).

Taulukko 9. Tutkimuksen sekoitusvaiheiden yhteenveto. Vaiheiden kaksi ja kolme arvojen perässä olevat prosenttiluvut on suhteutettu vaiheen 1 arvoihin. Vihreällä pohjalla on merkitty prosentit, jotka ovat lisääntyneet suhteessa jatkuvaan sekoitukseen ja punaisella pohjalla on arvot, jotka ovat vähentyneet suhteessa jatkuvaan sekoitukseen.

	Vaihe 1: Jatkuva sekoitus (100 %)	Vaihe 2: tauotettu sekoitus (%) jatkuva sekoituksesta)	Vaihe 3: Kaasusekoitus (%) jatkuva sekoituksesta)
Jakson pituus (vk)	4	4	2
Syötettä yhteensä t	10,8	10,61 98,2	9,86 91,2
Syötteen TS %	9,4	8,88 94,9	9,79 104,7
BMP (kWh/vrk)	1585,0	1633,1 103,0	1622,0 102,3
Tuotetun kaasun energiasisältö (kWh/vrk)	1396,9	1350,0 96,6	1297,1 92,9
BMP-toteuma (%)	88,1	82,7 93,8	80,0 90,7
Tuotettu lämpö ja sähköenergia (kWh/vrk)	1188,7	1209,1 101,7	1214,8 102,2
Tuotetun energian hyötysuhde (%)	85,1	89,6 105,2	93,7 110,1
Reaktorin lämmitysenergia	283,4	273,8 96,6	257,7 90,9
Laitoksen sähkönkulutus yhteensä (kWh/vrk)	128,1	94,7 73,9	69,7 54,4
-Reaktorin sekoitus (kWh/vrk)	55,2	33,5 60,7	22,6 40,9
-JKA:n sekoitus (kWh/vrk)	19,2	18,8 97,9	16,5 85,9
-Muu sähkönkulutus (kWh/vrk)	53,6	42,4 79,0	30,6 57,1
Energian kulutus yhteensä (kWh/vrk)	411,4	368,5 89,6	327,4 79,6
Sähkön oma kulutus / kaasun energia (%)	9,2	7,0 76,5	5,4 58,5
Lämmön omakulutus / kaasun energia (%)	20,3	20,3 100,0	20,8 102,7
Omakulutus yht. / kaasun energia (%)	29,5	27,3 92,7	26,2 88,9
Nettoenergia / kaasun energia (%)	55,6	62,3 111,9	67,4 121,1
Energiatase	3,4	3,7 (3,5) 107,9	4,0 (3,6) 116,7



Kuva 17. Reaktorin ja JKA:n mädätteen kuiva-ainepitoisuudet (ka %) sekä reaktorin ja JKA:n sekoittimien sähkönkulutukset (kWh/vrk) tutkimuksen viikoilla 11-20. Pystykatkoviivoilla on eroteltu tutkimuksen vaiheet.

5.8 Kuivajakeen ja nurmisäilörehun lisäsyötteenä tuottama nettoenergia

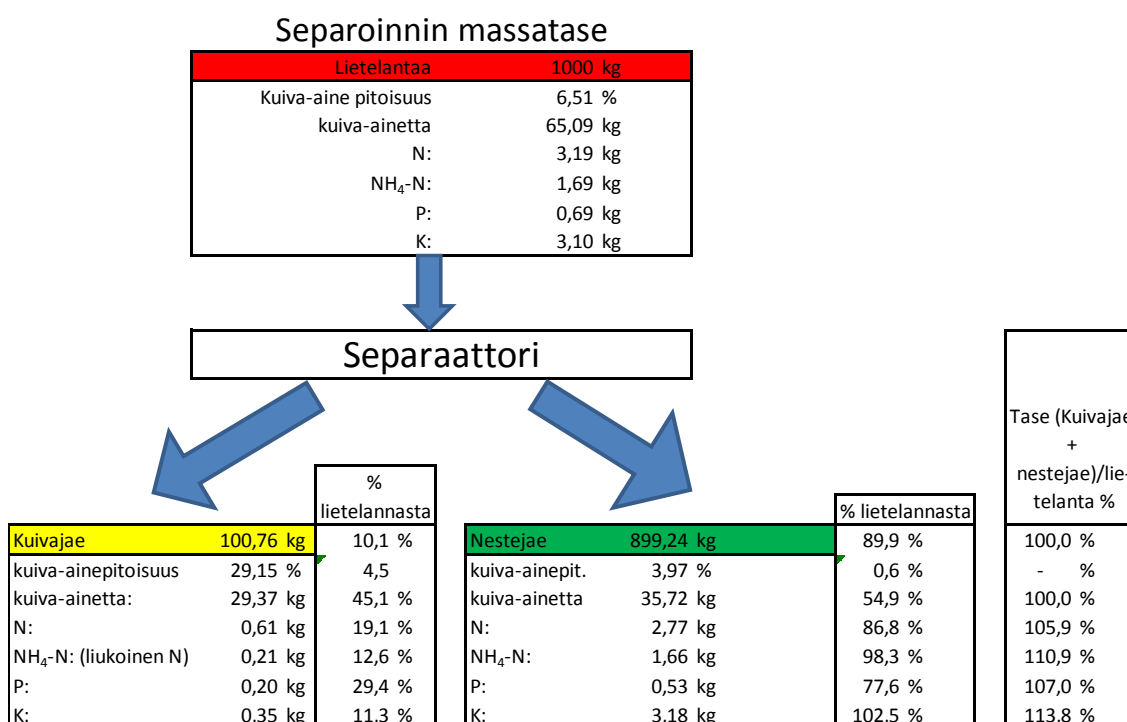
Korkein lisäsyötteen nettoenergia saavutettiin säilörehulla (Taulukko 10). Kuivajaetta lisäsyötteenä käyttämällä paras (292 kWh/vrk) nettoenergia saavutettiin separoimalla kolmen päivän välein ja tauottamalla sekoitusta. Kun reaktorin sekoitusta tauotettiin ja käytettiin 7–14 vuorokautta kompostoitunutta kuivajaetta nettoenergia oli 197 kWh/vrk. Pienempi nettoenergia johtuu heikommasta metaanintuottopotentialista ja pienemmästä orgaanisen aineen määrästä. Käyttämällä 1–3 vuorokautta kompostoitunutta kuivajaetta nettoenergia oli lähes 50 % korkeampi kuin käyttämällä 7–14 vrk kompostoitunutta kuivajaetta. Nurmisäilörehun toteutunut nettoenergia oli Pyykkösen ja Luostarisen (2018) saamien tulosten perusteella 647 kWh/vrk, joka on yli kaksi kertaa kuivajakeen nettoenergia.

Taulukko 10. Biokaasulaitoksen lisäsyötteiden ja sekoitusmenetelmien vertailu. Nurmisäilörehun toteutuneet arvot ovat Pyykkösen ja Luostarisen (2018) tutkimuksesta.

	Kuivajae (YSAO, kesä 2016)	Kuivajae (Luke, kesä 2016)	Nurmisäilörehu (2014 - 2015)
Reaktorin sekoitustapa	Tauotettu	Tauotettu	Tauotettu
Varastointiaika (vrk)	7-14	1-3	-
Lisäsyötteen massa (t/vrk)	1,0	1,0	1,0
Lisäsyötteen TS-pitoisuus (%)	24,2	24,3	25,2
Lisäsyötteen VS-pitoisuus (%)	21,8	21,7	23,0
BMP (kWh/tVS)	1220	1780	3260
BMP-toteuma koko laitoksessa (%)	82	82	90
Ulkoilman lämpötila (°C)	4	4	4
Syötteen lämpötila (°C)	21	21	8
Lisäsyötteen lämmittämiseen tarvittava energia kWh/vrk	15	15	28
Lisäsyötteen CH ₄ -tuotto (kWh/vrk)	212	307	675
lisäsyötteen nettoenergia (kWh/vrk)	197	292	647

5.9 Mädätteen separoinnin massa- ja ravinnetase

Separoinnin massa- ja ravinnetaseet laskettiin mädätteen separointikokeen tuloksista (liite 2). Tulokset ovat kolmen otoksen keskiarvoja (kuva 18). Tulokset on laskettu tiukan puristusvoiman kokeen perusteella. Separoidessa kuivajakeeseen erottui 10 % lietelannan massasta, 45 % kuivajakeesta ja melkein 30 % fosforista. Nestejakeeseen erottui typestä yli 98 % ja toisaalta separoitujen jäännösten taseet nousivat näytteenotto ja/tai mittausvirheen takia liukoisen typen osalta 110 %:iin. Myös fosforin (106 %) ja kaliumin (114 %) kokonaistaseet olivat mittausvirheen seurauksena yli 100 %.



Kuva 18. Separoinnin massatase.

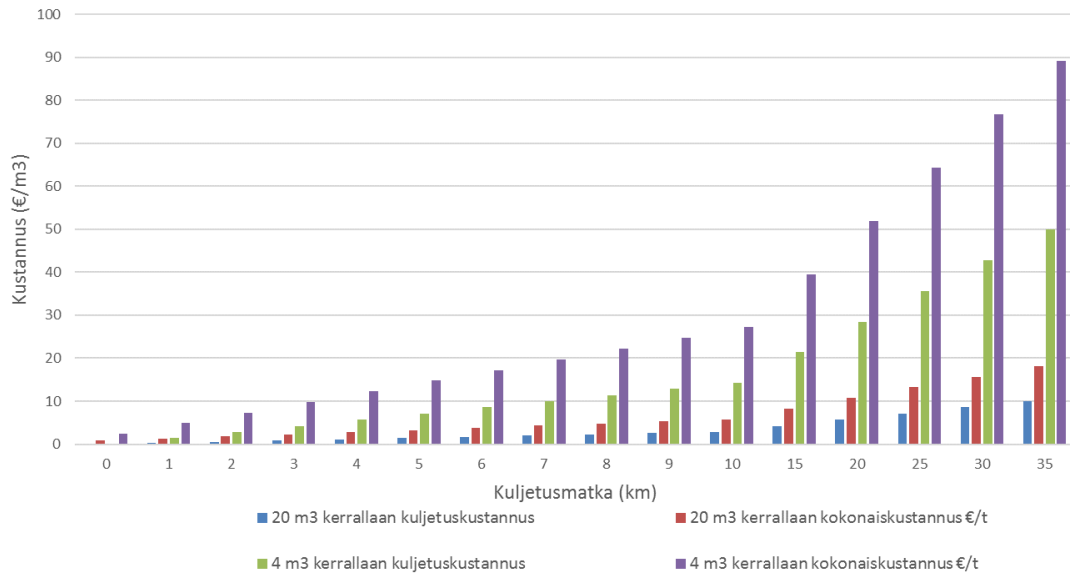
5.10 Lannan käsittelykustannukset

Lannan käsittelykustannuksia aiheutui lannan separoinnista, lastauksesta, kuljetuksesta ja purkamisesta. Lannan separointikustannus oli taulukossa 11 esitetyillä lähtöarvoilla ja Maaningan biokaasulaitoksen syötemäärillä 9,04 €/t kuivajaetta (taulukko 11). Tällöin lanta separoitiin kaksi kertaa. Tämä johtui siitä, että tuotaessa kuivajaetta yhteistyötiloilta vietiin vastaava määrä kuivajaetta tilalle takaisin. Separoinnin kiinteät kustannukset olivat yli 3700 €/v. Se tarkoittaa Maaningan kokoluokan biokaasulaitoksessa yli 62 %:a separoinnin kaikista kustannuksista (taulukko 11), joten separoitavan lannan vuotuinen määrä vaikuttaa separointihintaan €/kg huomattavasti. Taulukosta 11 voidaan nähdä ± merkillä, onko kustannus lisätty vai vähennetty separoinnin kustannuksista.

Lannan lastaus- ja kuljetuskustannus laskettiin 20 m³:n ja 4 m³:n kuljetusmäärille, jotta voitiin vertailla 2 viikon ja 3 päivän välein tapahtuvan separoinnin ja kuljetuksen kannattavuutta. Kahden viikon välein kuljetettaessa kuivajaetta lastauskustannus oli 0,82 €/t kuivajaetta (kuva 19, liite 3). Tämä kustannus aiheutuu joka tapauksessa, jos lantaa joudutaan siirtämään. Kuivajakeen kuljetuskustannukset nousivat noin 50 snt/t kuivajaetta jokaista kuljetettua kilometriä kohti, kun kuljetettiin 20 m³ kerrallaan (kuva 19). Kuljetettaessa 4 m³ kerrallaan lastauskustannus oli 2,39 €/t. Siirrosta aiheutuvat kustannukset olivat noin 2,5 €/km eli noin viisinkertaiset 20 m³ kuivalantamäärän kerrallaan siirtämiseen verrattuna.

Taulukko 11. Separointilaitteiston ja separoinnin vuotuiset kustannukset. Kustannusten jälkeen ± merkki kertoo, onko kustannus huomioitu lisääntyneenä (+) vai vähentyneenä kustannuksena (-).

Separaattoin kustannus (€/v)	+	3196,6 €
Kuivalantalan kustannus (€/v)	+	60,9 €
Lietepumpun kustannus (€/v)	+	532,8 €
Lietealtaan vuotuinen kustannus (€/v)	-	48,6 €
muuttuvat kustannukset		
Oman työn kustannus (€/v)	+	2166,9 €/v
Sähkönkulutus (kWh)		876,0 kWh
Sähkön hinta yhteensä (€/v)	+	87,6 €
Kustannukset yhteensä (€/v)		6596,2 €/v
Separoitava määrä (t/v)		730,0 t/v
kustannukset €/t		9,0 €/t



Kuva 19. Lannan siirtokustannukset kilometreittäin, kun kuivajaetta kuljetetaan 20 m³ tai 4 m³ kerrallaan. Arvot on laskettu taulukon 3 lähtöarvojen perusteella.

5.11 Mädatteen arvo

Mädatteen arvoksi saatiin 1345 €/v ± 200 €/v enemmän kuin lietelannan arvo riippuen teollisen lannoitteen ostoajankohdasta. Mädatteen arvon laskemisperusteet on esitetty luvussa 4.5. Mädatteen arvonnousu tarkoittaa noin 50 snt/t mädatettä ja reilun 8 % kokonaisnousua lannoitteen arvossa (liite 4). Mädatteen arvon nousuun vaikuttaa korvattavan lannoitteen arvo eli teollisten lannoitteiden hinta.

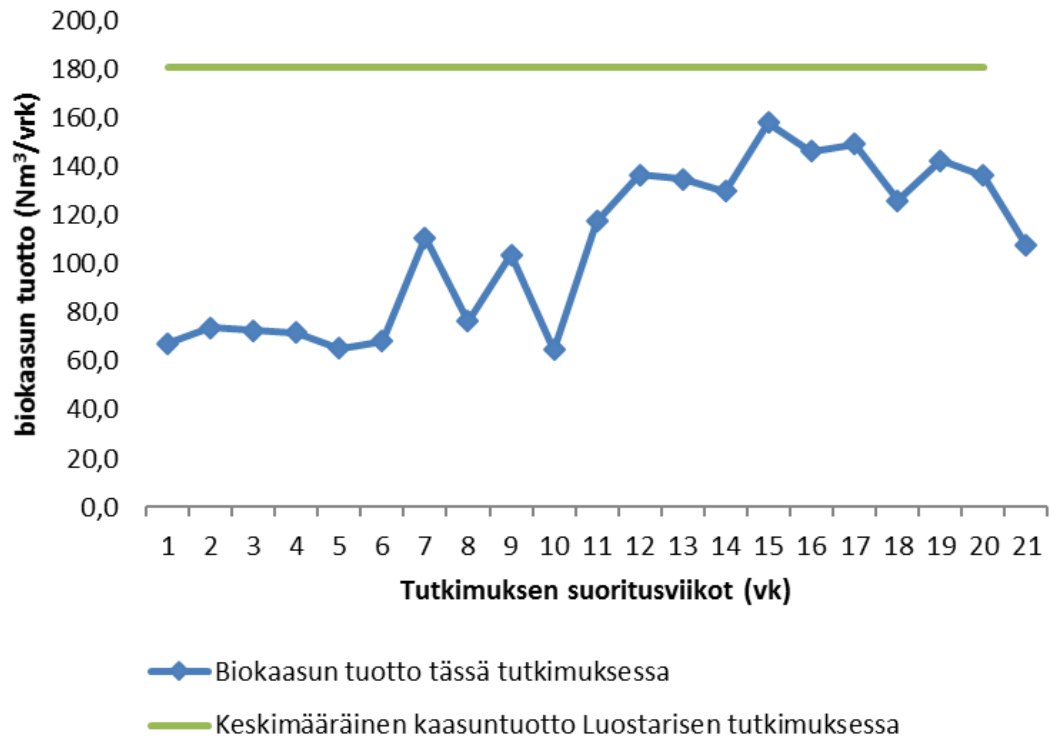
6 TULOSTEN TARKASTELU

Energiantuottojen, -kulutusten ja taseiden tulokset vastaavat Luostarisen (2013) saamia arvoja kohtalaisen hyvin. Myös kuivajakeen kuljetuskustannukset (€/km) vastaavat melko hyvin Palvan (2015) tuloksia keskimääräisistä urakointihinnoista, mutta ne olivat melkein puolet pienemmät kuin Winqvistin ym. (2015) 5 kilometrin matkalle laskema 5,95 €/t kustannus. Eroa on vaikea selittää, koska Winqvist ym. (2015) ei ole esittänyt laskelmansa lähtöarvoja. Toisaalta separointikustannukset olivat Winqvistin ym. (2015) mukaan samaa luokkaa kuin tässä tutkimuksessa.

6.1 Kuivajakeen käytön vaikutus Maaningan biokaasulaitoksen metaanintuottoon

Kuivajakeen metaanintuottoa verrattiin Luostarisen (2013) esittämään säilörehun metaanintuottoon (kuva 20). Luostarisen tutkimuksen loppuvaiheessa metaanintuotto oli $180 \text{ Nm}^3/\text{vrk}$, kun rehusyöte oli $780 \text{ kg}/\text{vrk}$. Syötteen kuiva-ainepitoisuus oli 8,6 %. Luostarisen (2013) tekemässä tutkimuksessa tutkimusta jatkettiin tällä kuormitustasolla 7 viikon ajan ennen suoritettua laskentaa, joten orgaaninen kuormitus ja mikrobikanta olivat ehtineet tasoittua riittävän pitkään ja tulokset ovat tämän tutkimuksen kannalta vertailukelpoisia.

Tässä tutkimuksessa metaanintuotto oli alhaisempi kuin säilörehulla tehdyssä (kuva 20), vaikka syötteen keskimääräinen kuiva-ainepitoisuus oli 0,5 %-yksikköä korkeampi (9,14 %). Tässä tutkimuksessa kaasuntuotto oli keskimäärin $138 \text{ Nm}^3/\text{vrk}$ ja Luostarisen tutkimuksessa se oli $180 \text{ Nm}^3/\text{vrk}$. Säilörehun metaanintuottopotentiaali on Pyykkösen ym. (2013) mukaan noin $260 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{vrk}$, joka on 47-160 % enemmän kuin tässä tutkimuksessa saadut kuivajakeen metaanintuottopotentiaalit. Kuivajakeen metaanintuottopotentiaali oli Pyykkösen ym. (2013) tutkimuksessa $206 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{vrk}$, joka on 16-104 % enemmän kuin tässä tutkimuksessa havaitut metaanintuottopotentiaalit. Tutkimusten välinen suuri ero johtuu kuivajakeen kompostoitumisesta tämän tutkimuksen aikana.



Kuva 20. Lietelannasta separoidun kuivajakeen metaanintuotto verrattuna säilörehun keskimääräiseen metaanintuottoon (Pyykkönen ym. 2013). Pyykkösen ym. (2013) tutkimus tehtiin samoilla laitteilla kuin tämä tutkimus, mutta syötteenä oli lietteen lisäksi nurmisäilörehua (780 kg/vrk).

6.2 Sekoitustavan vaikutus biokaasulaitoksen energiataseeseen

Tutkimushypoteesi 3 toteutui, sillä biokaasulaitoksen energiatase parani tauotetun ja kaasusekoituksen aikana jatkuvaan sekoitukseen verrattuna. Biokaasulaitoksen energiatase oli jatkuvan sekoituksen aikana 3,4, tauotetun sekoituksen aikana 3,7 ja kaasusekoituksen aikana 3,9. Huomioitaessa ulkolämpötilan aiheuttama lämmitystarpeen väheneminen tauotetun- ja kaasusekoituksen aikana taseiden erot pienenevät. Reaktorin lämmitystarpeen kompensoinnin jälkeen tauotetun sekoituksen tase oli 3,5 ja kaasusekoituksen tase 3,6.

Tutkimushypoteesi 4 toteutui eli sähkön omakäytön määrä pieneni siirryttäessä kaasusekoitukseen. Tauotetun sekoituksen sähkönkulutus oli 26 % pienempi kuin jatkuvan sekoituksen sähkönkulutus ja kaasusekoituksen sähkönkulutus oli 45 % pienempi kuin jatkuvan sekoituksen aikana (taulukko 9).

6.3 Sekoitustavan vaikutus biokaasulaitoksen metaanintuottoon

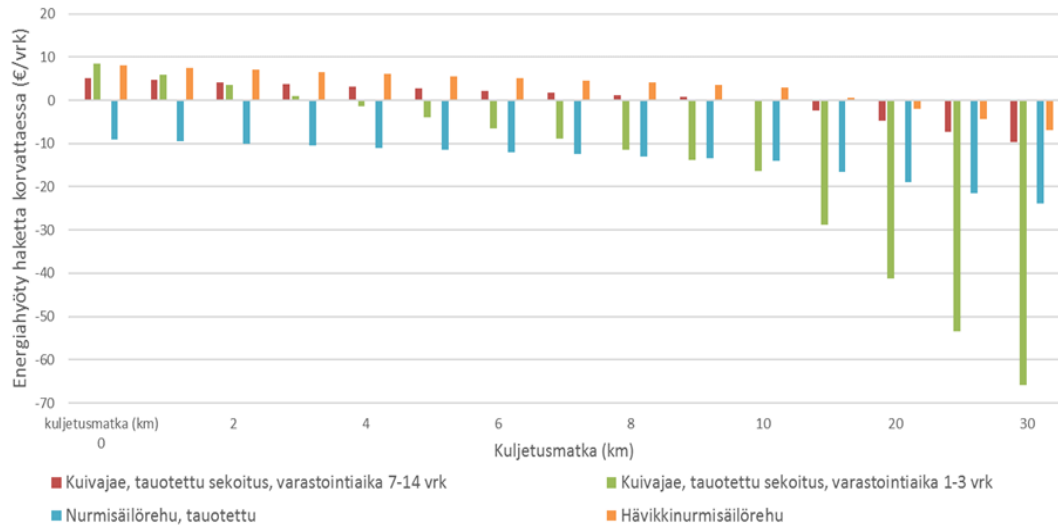
Biokaasuprosessi saatiin stabiiliksi, kun syötetty kuivajamäärä oli 1000 kg/vrk. Jatkuvan sekoituksen aikana tuotetun kaasun energiasisältö oli tämän tutkimuksen paras, vaikka syötteen metaanintuottopotentiaali oli heikoin (taulukko 9). Tutkimuksen vaiheissa kaksi ja kolme metaanintuotto jäi kauemmaksi todetusta metaanintuottopotentiaalista kuin jatkuvan sekoituksen aikana. Tutkimuksen vaiheen kolme kaasusekoitus ei todennäköisesti pystynyt sekoittamaan massaa tarpeeksi tehokkaasti ja metaanintuotto jäi kauemmaksi todetusta metaanintuottopotentiaalista (De Bok ym. 2004). Edellä mainittujen syiden takia jatkuvan sekoituksen tuotettu metaanin määrä jäi 86 %:iin potentiaalista, tuotetun sekoituksen aikana 82 %:iin potentiaalista ja kaasusekoituksen aikana 84 %:iin potentiaalista.

6.4 Kuivajakeen käytön kannattavuus suhteessa säilörehun käyttöön

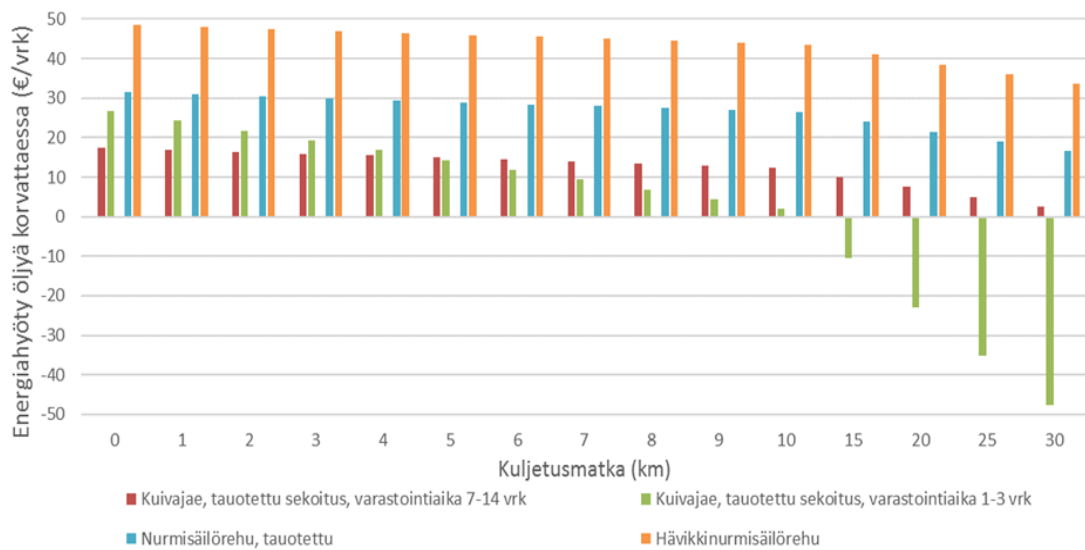
Kuivajakeen ja säilörehun käytön kannattavuuteen vaikuttivat kuivajakeen käyttökustannusten (separointi ja kuljetus) ja säilörehun tuotantokustannuksen välinen ero sekä syötteiden tuottama kaasumäärä. Luostarisen (2013) tutkimuksessa kuivajakeen metaanintuottopotentiaali oli 206 Nm³/vrk. Tässä tutkimuksessa kuivajakeen biokaasuntuottopotentiaali jäi 101–178 Nm³/vrk, koska separoidun kuivajakeen biokaasuntuottopotentiaali heikkeni kuivajakeen kompostoitua ennen reaktoriin syöttöä.

Säilörehulla tuotetulla biokaasulla hakkeen korvaaminen lämmön lähteenä oli kannattamatonta säilörehun korkean tuotantokustannuksen vuoksi (kuva 21, taulukko 12, liite 1). Hakelämmön korvaaminen hävikkisäilörehulla tai kuivajakeella tuotetulla biokaasulla oli juuri ja juuri kannattavaa. Öljyn korvaaminen kuivajakeella ja säilörehulla tuotetulla energialla oli kannattavaa (kuva 22, liite 1). Kuivajakeen kannattava kuljetusetäisyys oli 30 kilometriä, kun kuivajakeen varastointiaika oli 7–14 vuorokautta. Kuivajakeetta kannatti separoida kolmen päivän välein verrattuna 14 päivän välein separointiin, kun kuljetusmatka oli alle 5 kilometriä.

Hävikkisäilörehun hyödyt olivat suuremmat ja ne olivat selkeästi paremmat kuin säilörehun tuotanto pelkkää biokaasulaitosta varten (kuva 21, kuva 22, liite 1). Hävikkisäilörehun kuljettaminen kuivajakeen kanssa samalla nostaa kannattavuutta.



Kuva 21. Säilörehun, hävikkisäilörehun ja kuivajakeen käytön kannattavuus verrattuna hakkeeseen vaihtoehtoisena energian lähteenä. Kannattavuudet on laskettu päiväkohtaisen syötteen perusteella ja kuljetusmatkan funktiona.



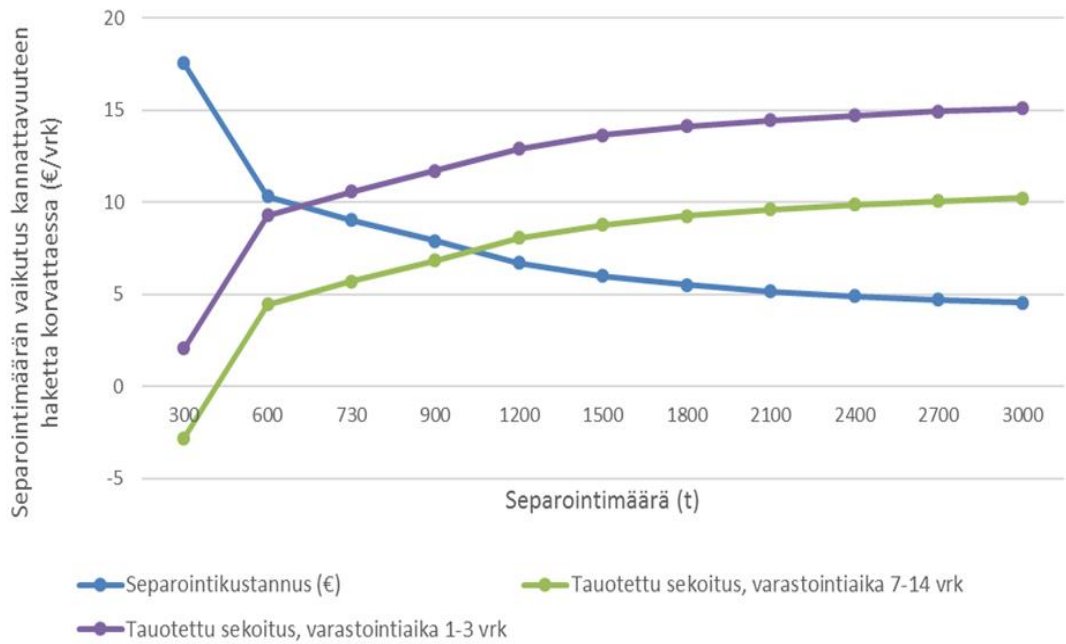
Kuva 22. Säilörehun, hävikkisäilörehun ja kuivajakeen käytön kannattavuus verrattuna öljyyn vaihtoehtoisena energian lähteenä. Kannattavuudet on laskettu päiväkohtaisen syötteen perusteella ja kuljetusmatkan funktiona.

Taulukko 12. Kuivajakeen ja säilörehun lisäsyötteenä tuottamat energiahyödyt ilman kuljetuskustannusta

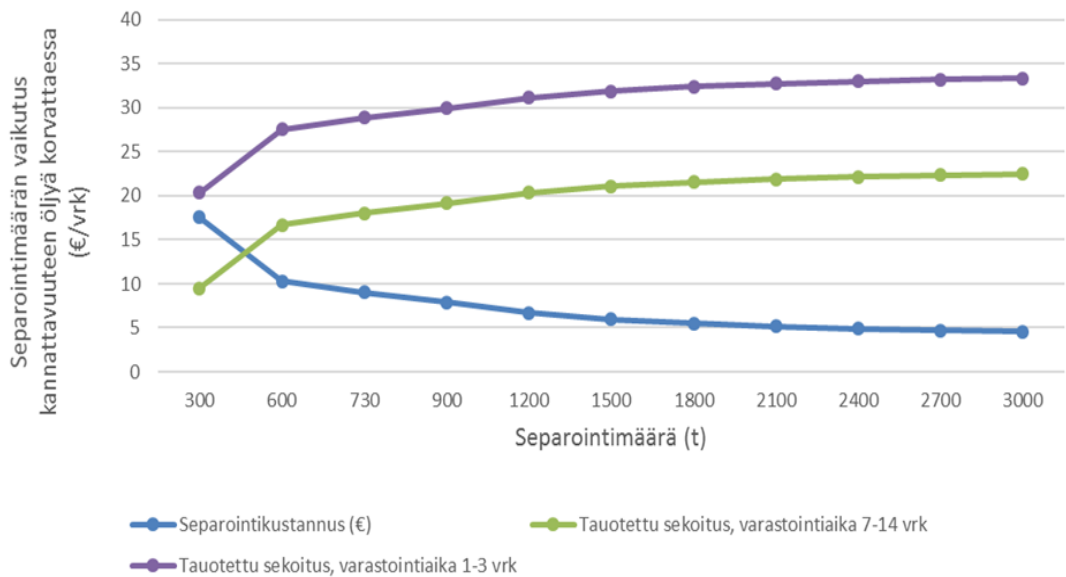
	Kuivajae (YSAO, kesä 2016)	Kuivajae (Luke, kesä 2016)	Nurmisäilörehu (2014 - 2015)	Hävikkinurmisäilörehu (2014-2015)
	Tauotettu	Tauotettu	Tauotettu	Tauotettu
Reaktorin sekoitustapa	▼			
Varastointiaika (vrk)	7-14	1-3	-	-
Lisäsyötteen massa (t)	1,0	1,0	1,0	1,0
Koko syötteen massa (t)	10,7	10,7	10,8	10,8
Lisäsyötteen nettoenergia (kWh/vrk)	196,5	292,3	646,6	646,6
sähköksi 26% (kWh)	51,1	76,0	168,1	168,1
sähkön arvo (€/vrk)	5,1	7,6	16,8	16,8
lämmöksi 61,5% (kWh)	120,9	179,7	397,7	397,7
korvattaessa haketta energian arvo (€/vrk)	4,87	7,25	16,04	16,04
Korvattaessa öljyä energian arvo (€/vrk)	17,16	25,51	56,45	56,45
syötteen tuottama lisäarvo hake	9,98	14,85	32,85	32,85
syötteen tuottama lisäarvo öljy	22,26	33,11	73,27	73,27
lannoitearvon nousu (€/t)	0,44	0,44	0,44	0,44
lannoitearvon nousu yhteensä (€)	4,8	4,8	4,8	4,8
syötekustannus (€/vrk)	8,77	8,77	45,84	28,80
hyöty yht. sähkö + hake (€/vrk)	5,99	10,85	-8,20	8,84
hyöty yht. sähkö + öljy (€/vrk)	18,27	29,12	32,22	49,26

6.5 Separointikustannuksen vaikutus kuivajakeen käytön kannattavuuteen

Separointikustannukseen vaikuttivat investoinnin suuruus, pääoman tuottovaatimus, sähkön hinta ja työvoiman kustannus. Separoitavan määrän vaikutus kustannukseen oli huomattava pienillä separointimäärillä (kuva 23, kuva 24, liite 5). Jos esimerkiksi Maaningan lietelanta/mädäte separoitaisiin vain yhden kerran, kustannus olisi noin 15 €/t. Kun separoitava määrä on 1500 t, kustannus on noin 5 €/t. Yli 1200 t vuotuisella separointimäärällä separointikustannus ei juurikaan enää laske ja on kustannuksiltaan kilpailukykyinen urakoitsijaan verrattuna, sillä urakoitsijan veloitus separoitaessa 200 m³ kerralla on 6,6–7,7 €/t (0-120 kilometrin laitteiston siirto tiloille) (Reiskone 2017). Urakoitsijaa käytettäessä täytyy kuitenkin huomioida, että varastoitaessa kuivajakea pitkiä aikoja kuivajae alkaa kompostoitua ja metaanintuottopotentiaali laskee.



Kuva 23. Separointikustannus ja sen vaikutus kannattavuuteen korvattaessa haketta lämmön tuotannossa.



Kuva 24. Separointikustannus ja sen vaikutus kannattavuuteen korvattaessa öljyä lämmön tuotannossa.

6.6 Kuivajakeen kannattava kuljetusetäisyys

Tutkimus osoitti, että kuivajae tuottaa lisäsyötteenä metaania vähemmän kuin säilörehu. Kannattavaan kuljetusetäisyyteen vaikuttaa lietelannan ja kuivajakeen kuiva-ainepitoisuus ja siitä saatava kaasun määrä. Kuvasta 21 (luku 6.3) nähdään, että haketta korvattaessa kustannukset saatiin katettua laskennallisesti, kun separoitua kuivajaeetta kuljetettiin

9 km päästä. Tällöin reaktorin sekoitusta tauotettiin ja kuivajakeen varastointiaika oli 7–14 vrk. Öljyä korvattaessa reaktorin tauottamisella ja 7–14 vrk:n kuivajakeen varastointiajalla kannattava kuljetusmatka oli 30 km. Joka kolmas päivä separoitaessa kannattava kuljetusetäisyys kevyttä polttoöljyä korvattaessa oli 10 km.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen ensimmäinen tavoite oli selvittää lietelannasta separoidun kuivajakeen soveltuvuus ja kannattavuus biokaasulaitoksen syötteeksi. Todettiin, että naudan lietelannasta separoitu kuivajae on teknisesti mahdollinen syöte reaktoriin ja sopiva syötemäärä on noin 10 % naudan lietelannan määrästä. Lisäksi havaittiin, että kuivajakeesta ei saada yhtä paljon kaasua kuin säilörehusta, mutta kuivajaeetta käyttämällä kyettiin tuottamaan sähkö- ja lämpöenergiaa pienemmillä kustannuksilla kuin säilörehua käyttämällä. Täten haketta korvattaessa kannattavaksi kuljetusetäisyydeksi saatiin 9 kilometriä ja öljyä korvattaessa 30 kilometriä.

Tutkimuksen toinen tavoite oli selvittää reaktorin sekoitustehon ja -tavan vaikutus metaanin tuottoon ja energiataseeseen. Tulosten perusteella reaktorin sekoituksen tauottaminen tuottaa yhtä paljon metaania (BMP:sta toteutuu yhtä suuri määrä) kuin jatkuva sekoitus, mutta sekoituksen tauottaminen pienentää sähkön kulutusta ja nostaa hiukan energiataasetta. Tauotetun sekoituksen sähkön kulutus oli 74 % jatkuvan sekoituksen sähkön kulutuksesta. Tuotettu kaasun energiasisältö väheni tauotuksen aikana noin 3 %. Kaasusekoituksella päästiin parhaimpaan energiataseeseen.

Tutkimushypoteesit 1–3 toteutuivat. Kuivajae oli teknisesti käyttökelpoinen syöte ja kuivajakeen käyttö oli taloudellisesti kannattavaa. Lisäksi sekoituksen tauottaminen vaikutti positiivisesti energiataseeseen ja kuivajakeen käytön kustannukset olivat pienemmät kuin säilörehun käytön kustannukset. Tuotetun kaasun energia oli pienempi tauottamisen aikana kuin jatkuvan sekoituksen aikana. Tutkimushypoteesi 4 toteutui siinä määrin, että kaasusekoituksen aikana sähkön omakulutus pieneni. Taloudellisesta kannattavuudesta ei kuitenkaan voida vetää suorja johtopäätöksiä, sillä tutkimus jouduttiin keskeyttämään kaasusekoituksen aikana.

Tutkimuksen laskelmien oletus oli, että kuivajaeetta viedään tilalle takaisin yhtä paljon kiloina kuin sitä tuotiin yhteistyötilalta. Lisäksi separointikustannuksissa on huomioitu

vain yksi separaattori, joten separaattoria jouduttaisiin kuljettamaan edestakaisin tilojen välillä. Toisen separaattorin hankinta lisäisi separointikustannuksia noin 6 €/t. Tilojen välisessä yhteistyössä myös hävikkirehu kannattaa todennäköisesti tuoda samalla kalustolla kuin kuivajae, sillä hävikkirehun käytön energiahyödyt olivat positiivisia ja hävikkirehun hävityksestä aiheutuisi muutenkin kustannuksia.

8 KIITOKSET

Tutkimus oli osa lantalogistiikka-hanketta ja haluaisin osoittaa kiitokseni Luonnonvarakeskukselle mielenkiintoisen graduaiheen tarjoamisesta. Haluan kiittää myös luonnonvarakeskuksen tutkijaa filosofian maisteri Ville Pyykköstä gradun ohjaamisesta. Lisäksi haluan kiittää professori Laura Alakukkua, yliopistonlehtori Hannu Mikkolaa ja yliopistonlehtori Hanna-Riitta Kymäläistä työn ohjaamisesta ja aktiivisesta palautteen antamisesta.

LÄHTEET

- Ahonen, J & Koivistoinen, P. 2014. Lantalogistiikka ja etävarastointi. Opinnäytetyö. REKKA-hanke. Paikkakunta: Iisalmi. Savonia-Ammattikorkeakoulu. Luonnonvara- ja ympäristöala. 43 s.
- Arkima, S. 2015. Naudanlanta biokaasulaitosraaka-aineena, käsittely ja logistiikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 121 s.
- ASABE Standards 2005. D384.2. Manure production and characteristics. <http://extension.psu.edu/animals/dairy/nutrient-management/certified-dairy/tools/manure-production-char-d384-2.pdf>. St. Joseph, Mich.: ASABE. Viitattu 24.3.2017.
- Al Seadi, T. 2001. Good practice in quality management of AD residues from biogas production. Task 24. Energy from Biological Conversion of organic Waste. Esbjerg, Denmark: IEA Bioenergy. 32 p.
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. & Janssen, R. 2008. Biogas handbook. Esbjerg, Tanska: University of Southern Denmark Esbjerg. 126 p.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Moitzi, G., Amon, T. & Zechmeister-Boltenstern, S. 2006. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle and pig slurry and influence of slurry treatment. Wien, Itävalta: University of Natural Resources and Applied Life Sciences. 7 p.
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K. & Gruber, L. 2007. Biogas production from maize and dairy cattle manure: Influence of biomass composition on the methane yield. Agriculture, Ecosystems & Environment 118 (1-4): 173-182.
- Björnsson, L., Mattiansson, B. & Henrysson, T. 1997. Effects of support material on the pattern of volatile fatty acid accumulation at overload in anaerobic digestion of semi-solid waste. Applied microbiology and biotechnology 47 (6): 640-644.
- Bo Holm-Nielsen, J., Halberg, N., Huntingford, S. & Al Seadi, T. 1997. Joint Biogas Plant, Agricultural Advantages – circulation of N, P and K. Second edition. Denmark: Danish energy agency. 32 p.
- Budzianowski, W. M. & Postawa, K. 2015. Renewable energy from biogas with reduced carbon dioxide footprint: Implications of applying different plant configurations and operating pressures. Renewable and Sustainable Energy Reviews 68, part 2: 852-868.
- De Bok, F. A. M., Plugge, C. M. & Stams, A. J. M. 2004. Interspecies electron transfer in methanogenic propionate degrading consortia. Water Research 38 (6): 1368-1375.
- De La Rubia, M, A., Perez, M., Romero, L, I. & Sales, D. 2006. Effect of solids retention time (SRT) on pilot scale anaerobic thermophilic sludge digestion. Process Biochemistry 41 (1): 79-86.
- Dennis, A. & Burke P. E. 2001. Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook. Washington, United States: Environmental Energy Company. 57 p.

EBA. 2015. Biomethane & Biogas Report. <http://european-biogas.eu/2015/12/16/biogasreport2015/>. European Biogas Association. Viitattu 22.3.2017.

Fatima, S. 2015. Naudanlanta biokaasulaitosraaka-aineena, käsittely ja logistiikka. Helsinki: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 121 s.

Finlex. 2005. Rakennusten ja rakennustilojen yksikkökustannuksia. <http://www.finlex.fi/data/normit/25697-06040fil.pdf>. Maa- ja metsätalousministeriö. Maaseutu- ja luonnonvaraosasto, MMM-RMO E2.1- 1(5). Viitattu 15.3.2017.

Haandel, A.V. & Lubbe, J. V. D. 2007. Handbook biological waste water treatment: Design and optimization of activated sludge systems. Leidsendam, Hollanti: Quist Publishing. 537 s.

Hansen, H. K., Angelidaki, I. & Ahring, K. B. 1998. Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia. Water Research 32 (1): 5-12.

Hellstedt, M. 2009. Lannan varastointi. Teoksessa: Palva, R., Alasuutari, S. & Harmoinen, T. (toim.). Lannan käsittely ja käyttö. ProAgrian Keskusten Liiton julkaisuja nro 1073. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy. s. 48-57.

Hellstedt, M., Torniainen, M. & Alasuutari, S. 2009. Lannan käsittelymenetelmät. Teoksessa: Palva, R., Alasuutari, S. & Harmoinen, T. (toim.). Lannan käsittely ja käyttö. ProAgrian Keskusten Liiton julkaisuja nro 1073. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy. s. 58-70.

Hutnan, M., Spalkova, V., Bodik, I., Kolesarova, N. & Lazor, M. 2009. Biogas production from maize grains and maize silage. Department of environmental engineering. Bratislava: Slovak University of Technology. 8 s.

Huttunen, M. & Kuittinen, V. 2015. Suomen biokaasulaitosrekisteri N:O 18. Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences No 2. Joensuu: Itä-Suomen Yliopisto. Grano Oy. 50 s.

Ilmatieteenlaitos 2018. Ilmatieteen laitoksen avoin data ja lähdekoodi. <https://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data>. Viitattu 6.2.2018.

Kaparaju, P., Inmaculada, B., Ellegaard, L. & Angelidakia, I. 2008. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies. Bioresource Technology 99: 4919-4928.

Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, T. K. & Al-Dahhan, M. H. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. Water Research 39: 3597-3606.

Karjalainen, L. 2010. Tilastotieteen perusteet. Ristiina: Pii-kirjat 2010. 256 s.

Kässi, P. & Seppälä, A. 2012. Production cost of excess silage for bioenergy in Finnish cattle farms. Agrifood Research. Teoksessa: Kässi, P. ym. (toim.). International Silage conference, Heinäkuu 2012. Suomi, Hämeenlinna: MTT Agrifood Research Finland. s. 462-463.

Kässi, P., Lehtonen, H., Rintamäki, H., Oostra, H. & Sindhøj, E. 2013. Economics of manure logistics, separation and land application. Knowledge report. WP3 Innovative technologies for manure handling. Ruotsi: Swedish institute of agricultural and environmental engineering. 33 s.

Latvala, M. 2009. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Suomen ympäristö 24/2009. Helsinki: Ympäristöministeriö. 117 s.

Lehtinen, S. 2011. Lietelannan separointikokeilu TEHO-tiloilla. Teoksessa: Lillunen, A. & Yli-Renko, M. (toim.). Fosforin kerrostuminen, Lietteen levitys sokerijuurikkaalle, Lannan levityskokeilut, Separointi, Typen poisto. TEHO-hankkeen raportteja, osa 4. Teho-hankkeen julkaisuja 6/2011. Helsinki: Edita Prima Oy. 84 s.

Lehtomäki, A., Huttunen, S., Lehtinen, T. M. & Rintala, J. A. 2006. Anaerobic digestion of grass silage in batch leach bed processes for methane production. *Bioresource Technology* 99: 3267-3278.

Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S. & Rintala, J. 2007. Biokaasusta energiaa maatalouteen – Raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. Jyväskylä: Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 85. 70 s.

Lesteur, M., Bellon-Maurel, V., Gonzalez, C., Latrille, E., Roger, J. M., Junqua, G. & Steyer, J. P. 2010. Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. *Process Biochemistry* 45: 431-440.

Luke 2011. Biokaasulaitosten kannattavuus paranemassa. <https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/mtt/mtt/ajankohtaista/Uutisarkisto/2011/Biokaasulaitosten%20kannattavuus%20paranemassa>. Viitattu 1.2.2017.

Luke 2013. Biokaasulaitosten suurin haaste on kannattavuus. <https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/mtt/mtt/ajankohtaista/Uutisarkisto/2013/Biokaasulaitosten%20suurin%20haaste%20on%20kannattavuus>. 1.2.2017.

Luostarinen, S. 2013. Biokaasuteknologiaa maataloilla I: Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi - käytännön kokemuksia MTT:n maatilakohtaiselta laitoksella. Jokioinen: MTT. 98 s.

Luostarinen, S., & Pyykkönen, V. 2013. 2 Biokaasuteknologian perusteet. Teoksessa: Luostarinen, S. (toim.). Biokaasuteknologiaa maataloilla I. Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi - käytännön kokemuksia MTT:n maatilakohtaiselta laitoksella. Jokioinen: MTT. 98 s.

Luostarinen, S., Pyykkönen, V., Winqvist, E., Kässi, P., Grönroos, J., Manninen, K. & Rankinen, K. 2016. Maatilojen biokaasulaitokset: Mahdollisuudet, kannattavuus ja ympäristövaikutukset. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 62 s.

Mata-Alvarez, J., Mace, S. & Liabres, P. 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology* 74: 3-16.

- Mavi 2008. Ravinnetaseet. Ympäristötuen lisätoimenpide lannoituksen ja sadon ravinnemäärien seurantaan. http://www.mavi.fi/fi/oppaat-ja-lomakkeet/viljelijä/Documents/Ravinnetaseohje_2008.pdf. Edita Prima Oy: Maaseutuvirasto. Viitattu 13.1.2017.
- Metener 2017. Biokaasulaitokset. <http://www.metener.fi/5>. Laukaa: Metener Oy. Viitattu 18.9.2017.
- Moffit, D. 1999. Waste management and recycling of organic matter. Teoksessa: CIGR Handbook of agricultural engineering, volume II: Animal production & aquacultural engineering. USA, Michigan: American Society of Agricultural Engineers. p. 163-187.
- Ogejo, J.A., Wildeus, S., Knight, P. & Wilke, R.B. 2010. Estimating goat and sheep manure production and their nutrient contribution in the Chesapeake bay watershed. ASAE 2005. Manure Production and characteristics. Standard ASAE D384.2 MAR2005. USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers. 20 s.
- Paavola, T., Winquist, E., Pyykkönen, V., Luostarinen, S., Grönroos, J., Manninen, K. & Rankinen, K. 2016. Lantaravinteiden kestävä hyödyntäminen tiloilla ja keskitetyssä biokaasulaitoksessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 33/2016. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 55 s.
- Palva, R. 2015. Konetyön kustannukset ja tilastolliset urakointihinnat. TTS:n tiedote: Maataloustyö ja tuottavuus 3/2015 (661).
- ProAgria 2011. Nurmentuotannon tulokset 2011. Diasarja. https://www.proagria.fi/sites/default/files/attachment/nurmentuotannon_tulokset_2011.pdf. Satakunta: ProAgria. Viitattu 15.11.2016.
- Pyykkönen, V. & Luostarinen, S. 2013. 4 Biokaasukokeiden materiaalit ja menetelmät. Teoksessa: Luostarinen, S. (toim.). Biokaasuteknologiaa maataloilla I. Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi - käytännön kokemuksia MTT:n maatilakohtaiselta laitoksella. Jokioinen: MTT. 98 s.
- Pyykkönen, V. Luostarinen, S., & Rintala, J. 2013. 5 Maatilamittakaavan biokaasukokeiden tulokset. Teoksessa: Luostarinen, S. (toim.). Biokaasuteknologiaa maataloilla I. Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi - käytännön kokemuksia MTT:n maatilakohtaiselta laitoksella. Jokioinen: MTT. 98 s.
- Pyykkönen, V. 2015. Lantalogistiikan kehittäminen karjataloilla. <https://www.luke.fi/projektit/lantalogistiikka/>. Viitattu 14.3.2017.
- Regina, K., Lehtonen, H., Palosuo, T & Ahvenjärvi, S. 2014. Maatalouden kasvihuonepäästöt ja niiden vähentäminen. Jokioinen: MTT:n raportti 127. 44 s.
- Reiskone 2017. Alla esimerkkejä tyypillisen separointiurakointikohteen kustannuksista. <http://separointi.fi/separointiurakointi/separoinnin-hinta/>. Reiskone Oy. Viitattu 31.3.2017.
- Rico, C., Rico, J. L., Garcia, H. & Garcia, P. A. 2012. Solid – Liquid separation of dairy manure: Distribution of components and methane production. Biomass and Bioenergy 39: 370-377.

SFS 1990. SFS 3008, Veden, lietteen ja sedimentin kuiva-aineen ja hehkutusjäännöksen määrittäminen. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto ry.

Suomalainen, M. 2007. Naudan lietelannan käsittelymenetelmien taloudellinen vertailu. Lappeenranta teknillinen yliopisto. ympäristötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 168 s.

Steffen, R., Szolar, O & Braun, R. 1998. Feedstocks for anaerobic digestion. Vienna: Institute of agrobiotechnology tulln. University of agricultural sciences. 29 s.

Taavitsainen, T., Kapuinen, P. & Survo, K. 2002. Maatalouden lietteiden ja lantojen keskittelyn käsittelyn mallinnus. MALLA-hankkeen loppuraportti. Pohjois-Savon ammattikorkeakoulu. 139 s.

Taavitsainen, T. 2011. Biokaasuteknologian edistäminen Pohjois-Savossa – Kestävä uusiutuvan energian tuotanto ja ravinteiden kierrätys (BIOTILA – hanke). MTT. 88 s.

Tawfik, A., Sobhey, M & Badawy. M. 2006. Treatment of a combined dairy and domestic wastewater in an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor followed by activated sludge (AS system). Kairo, Egypti: Department of Sanitary Engineering, Ain Shams University. 167-177.

Triolo, J. M., Sommer, S. G., Møller, H. B., Weisbjerg, M, R. & Jiang, X. Y. 2011. A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential. Bioresource Technology 102: 9395-9402.

Yli-Puntari, J. 2013. Biokaasuprosessin metanogeenisten bakteerien määrittäminen – Menetelmän kehitys. Opinnäytetyö. Paikkakunta: Turku. Turun Ammattikorkeakoulu. Bio- ja elintarviketekniikka. 36 s.

Wellinger, A. 1999. Process design of agricultural digesters. Ettenhausen, Sveitsi: Nova Energie GmbH. 28 s.

Winqvist, E., Luostarinen, S., Kässi, P., Pyykkönen, V. & Regina, K. 2015. Maatilojen biokaasulaitosten kannattavuus ja kasvihuone- kaasujen päästövähennys. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 36. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 46 s.

Ørtenblad, H. 2015. The use of digested slurry within agriculture. <http://homepage2.nifty.com/biogas/cnt/refdoc/whrefdoc/d9manu.pdf> Tanska: Herning Municipal Utilities. Viitattu 26.10.2016.

Liite 1. Kuljetusmatkan aiheuttamat kustannukset

Energiahyöty haketta korvattaessa (€/vrk)	Reaktorin sekoitustapa Varastointiaika (vrk)	Kuivajae, tauotettu sekoitus, varastointiaika 7-14 vrk (YSAO, kesä 2016)	Kuivajae, tauotettu sekoitus, varastointiaika 1-3 vrk (Luke, kesä 2016)	Nurmisäilörehu, tauotettu (2014 - 2015)	Hävikkinurmisäilöre hu (2014-2015)
		Tauotettu 7-14	Tauotettu 1-3	Tauotettu -	Tauotettu -
	kuljetusmatka (km)				
	0	5,17	8,46	-9,02	8,02
	1	4,67	5,98	-9,51	7,53
	2	4,18	3,50	-10,01	7,03
	3	3,68	1,02	-10,51	6,53
	4	3,18	-1,46	-11,00	6,04
	5	2,69	-3,93	-11,50	5,54
	6	2,19	-6,41	-11,99	5,05
	7	1,70	-8,89	-12,49	4,55
	8	1,20	-11,37	-12,98	4,06
	9	0,71	-13,85	-13,48	3,56
	10	0,21	-16,33	-13,98	3,06
	15	-2,27	-28,72	-16,45	0,59
	20	-4,75	-41,11	-18,93	-1,89
	25	-7,22	-53,50	-21,41	-4,37
	30	-9,70	-65,89	-23,89	-6,85
	35	-12,18	-78,28	-26,37	-9,33

Energiahyöty öljyä korvattaessa (€/vrk)	Reaktorin sekoitustapa Varastointiaika (vrk)	Kuivajae (YSAO, kesä 2016)	Kuivajae (Luke, kesä 2016)	Nurmisäilörehu (2014 - 2015)	Hävikkinurmisäilöre hu (2014-2015)
		Tauotettu 7-14	Tauotettu 1-3	Tauotettu -	Tauotettu -
	0	17,45	26,72	31,40	48,44
	1	16,95	24,24	30,90	47,94
	2	16,46	21,77	30,40	47,44
	3	15,96	19,29	29,91	46,95
	4	15,47	16,81	29,41	46,45
	5	14,97	14,33	28,92	45,96
	6	14,47	11,85	28,42	45,46
	7	13,98	9,37	27,93	44,97
	8	13,48	6,90	27,43	44,47
	9	12,99	4,42	26,94	43,98
	10	12,49	1,94	26,44	43,48
	15	10,01	-10,45	23,96	41,00
	20	7,54	-22,84	21,48	38,52
	25	5,06	-35,23	19,00	36,04
	30	2,58	-47,63	16,53	33,57
	35	0,10	-60,02	14,05	31,09

Liite 2. Separointikokeen tulokset

(Ville Pyykkönen) Kuvan värit ovat näytteen tunnuksien värejä. Punaisella merkityissä sattui mittausvirhe.

"Mädätysjäännös tiukka" edustaa sekä löysän että tiukkaan puristusvoiman separointiin mennyttä lietettä.

Näytteenro	Näytteen tunni	Näytteen tunnus	Tiheys kg/m ³	ka %	Kok.N kg / t	Liukoinen N kg / t	Fosfori kg / t	Kalium kg / t
1	täyttö 1	Nestejäte löysä	1000	3,9	2,75	1,35	0,56	3,14
2	täyttö 1	Kuivajäte löysä	856	20,0	5,32	1,83	1,48	3,23
3	täyttö 1	Mädätysjäännös tiukka	1000	6,7	3,19	1,65	0,71	3,20
4	täyttö 1	Nestejäte tiukka	1000	3,9	2,79	1,58	0,49	3,05
5	täyttö 1	Kuivajäte tiukka	587	28,8	6,23	2,07	1,99	3,16
6	täyttö 2	Nestejäte löysä	1000	8,1	2,77	1,51	1,02	5,99
7	täyttö 2	Kuivajäte löysä	879	19,0	4,63	1,79	1,38	3,40
8	täyttö 2	Mädätysjäännös tiukka	1000	6,3	3,07	1,60	0,71	3,17
9	täyttö 2	Nestejäte tiukka	1000	4,0	2,66	1,59	0,56	3,20
10	täyttö 2	Kuivajäte tiukka	592	28,6	6,05	2,09	1,88	3,21
11	täyttö 3	Nestejäte löysä	1000	3,8	2,74	1,64	0,54	3,22
12	täyttö 3	Kuivajäte löysä	834	20,5	5,17	1,96	1,70	3,55
13	täyttö 3	Mädätysjäännös tiukka	1000	6,5	3,31	1,81	0,63	2,92
14	täyttö 3	Nestejäte tiukka	1000	4,0	2,85	1,80	0,55	3,29
15	täyttö 3	Kuivajäte tiukka	548	30,1	5,85	2,14	2,13	4,03

Liite 3. Kuljetuskustannuksen arvot

Kuljetuskustannus separoitaessa kahden viikon välein

Kuljetusmatka km	ajoaika kahteen suuntaan, h	kuljetuskustannus €/ 20 m ³	20 m ³ kerrallaan				20 m ³ kerrallaan	
			20 m ³ kerrallaan kuljetuskustannus	20 m ³ kerrallaan kuljetus + lastaus	€/m ³	€/m ³	kokonaiskustannus €/m ³	kokonaiskustannus €/t
0	0	0	0	9,44	0,47		0,47	0,82
1	0,10	5,70	0,285	15,14	0,76		0,76	1,32
2	0,20	11,40	0,57	20,84	1,04		1,04	1,81
3	0,30	17,10	0,855	26,54	1,33		1,33	2,31
4	0,40	22,80	1,14	32,24	1,61		1,61	2,80
5	0,50	28,50	1,425	37,94	1,90		1,90	3,30
6	0,60	34,20	1,71	43,64	2,18		2,18	3,79
7	0,70	39,90	1,995	49,34	2,47		2,47	4,29
8	0,80	45,60	2,28	55,04	2,75		2,75	4,79
9	0,90	51,30	2,565	60,74	3,04		3,04	5,28
10	1,00	57,00	2,85	66,44	3,32		3,32	5,78
15	1,50	85,50	4,275	94,94	4,75		4,75	8,26
20	2,00	114,00	5,7	123,44	6,17		6,17	10,73
25	2,50	142,50	7,125	151,94	7,60		7,60	13,21
30	3,00	171,00	8,55	180,44	9,02		9,02	15,69
35	3,50	199,50	9,975	208,94	10,45		10,45	18,17

Kuljetuskustannus separoitaessa kolmen päivän välein

Kuljetusmatka, km	ajoaika kahteen suuntaan, h	kuljetuskustannus €/ 4 m ³	4 m ³ kerrallaan				4 m ³ kerrallaan	
			4 m ³ kerrallaan kuljetuskustannus	4 m ³ kerrallaan kuljetus + lastaus	€/m ³	€/m ³	kokonaiskustannus €/m ³	kokonaiskustannus €/t
0	0	0	0	5,51	1,38		1,38	2,39
1	0,10	5,70	1,425	11,21	2,80		2,80	4,87
2	0,20	11,40	2,85	16,91	4,23		4,23	7,35
3	0,30	17,10	4,275	22,61	5,65		5,65	9,83
4	0,40	22,80	5,7	28,31	7,08		7,08	12,31
5	0,50	28,50	7,125	34,01	8,50		8,50	14,79
6	0,60	34,20	8,55	39,71	9,93		9,93	17,26
7	0,70	39,90	9,975	45,41	11,35		11,35	19,74
8	0,80	45,60	11,4	51,11	12,78		12,78	22,22
9	0,90	51,30	12,825	56,81	14,20		14,20	24,70
10	1,00	57,00	14,25	62,51	15,63		15,63	27,18
15	1,50	85,50	21,375	91,01	22,75		22,75	39,57
20	2,00	114,00	28,5	119,51	29,88		29,88	51,96
25	2,50	142,50	35,625	148,01	37,00		37,00	64,35
30	3,00	171,00	42,75	176,51	44,13		44,13	76,74
35	3,50	199,50	49,875	205,01	51,25		51,25	89,13

Liite 4. Määtysjäännöksen arvon määrittäminen

	kg	N	P	K	tn/v	€
Lähtöarvot:						
Liukoinen ravinne liete kg/m ³		1,40	0,690	3,10		
Liukoinen ravinne mädäte kg/m ³		1,69	0,686	3,10		
Lietelanta määrä kg/v					3500,00	
Määtysjäännös määrä kg/v					3500,00	
Liukoinen ravinne vuodessa liete kg	4900,00		2415,00	10850,00		
Liukoinen ravinne vuodessa mädäte kg	5901,98		2400,31	10847,35		
Starttiravinne €/kg						0,97
Yarabela suomensalpietari €/kg						0,46
Kaliumsulfaatti €/kg						1,15
Lietelannan ravinteiden arvo						
Starttiravinne kg	10500,00	1260,00	2415,00	0,00		10205,19
Yarabela suomensalpietari kg	13481,48	3640,00	0,00	134,81		6237,78
Kaliumsulfaatti kg	26134,60	0,00	0,00	10715,19		30064,84
Lietelannan ravinteiden arvo yhteensä €						46507,81
Mädätteen ravinteiden arvo						
Starttiravinne kg	10436,13	1252,34	2400,31	0,00		10143,11
Yarabela suomensalpietari kg	17220,92	4649,65	0,00	172,21		7967,99
Kaliumsulfaatti kg	26036,92	0,00	0,00	10675,14		29952,47
Lietelannan ravinteiden arvo yhteensä €						48063,57
Mädäte arvokkaampaa kuin liotelanta €/v						1555,76

Liite 5. Separointimäärän vaikutus kannattavuuteen toteutuneet arvot

Separointimäärän vaikutus öljyä korvattaessa (€/vrk)

Separointikustannus (€)	Kuivajae , Tauotettu sekoitus, varastointiaika 7-14vrk		Kuivajae, Tauotettu sekoitus, varastointiaika 1-3 vrk	
	Tauotettu	Tauotettu		
Reaktorin sekoitustapa				
Varastointiaika (vrk)	7-14	1-3		
Tulos ilman separointia hake (€)	27,04	37,89		
300	17,56	9,48		20,33
600	10,32	16,72		27,57
730	9,04	18,00		28,85
900	7,91	19,13		29,98
1200	6,71	20,33		31,18
1500	5,98	21,06		31,91
1800	5,5	21,54		32,39
2100	5,16	21,88		32,73
2400	4,9	22,14		32,99
2700	4,70	22,34		33,19
3000	4,54	22,50		33,35

Separointimäärän vaikutus haketta korvattaessa (€/vrk)

Separoitava määrä (t)	Reaktorin sekoitustapa	Kuivajae (YSAO, kesä 2016)		Kuivajae (Luke, kesä 2016)	
		Tauotettu	Tauotettu		
Varastointiaika (vrk)	7-14	1-3			
Tulos ilman separointia hake (€)	14,76	19,62			
Separoitava määrä (t)	Separointikustannus (€)				
300	17,56	-2,80			2,06
600	10,32	4,44			9,30
730	9,04	5,72			10,58
900	7,91	6,85			11,71
1200	6,71	8,05			12,91
1500	5,98	8,78			13,64
1800	5,5	9,26			14,12
2100	5,16	9,60			14,46
2400	4,9	9,86			14,72
2700	4,7	10,06			14,92
3000	4,54	10,22			15,08